

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE LUÍS SAUER OLIVEIRA

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE RELÉ DE POTÊNCIA
REVERSA PARA MICROGERAÇÃO**

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO DE RELÉ DE POTÊNCIA REVERSA PARA MICROGERAÇÃO

Projeto de Diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para Graduação em
Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Dr. Ály Ferreira Flores Filho

1

Porto Alegre
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE LUÍS SAUER OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE RELÉ DE POTÊNCIA REVERSA PARA MICROGERAÇÃO

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

University of Wales College of Cardiff, Cardiff, País de Gales

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela University of Wales College of Cardiff, Cardiff, País de Gales

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande Sul – Porto Alegre, Brasil

Msc. Carlos Sonier Nascimento, UFRGS

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, dezembro de 2010.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Aos pais, pelo apoio e pelos ensinamentos que hoje são base da minha formação.

Aos colegas pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na concepção, realização e revisão deste trabalho.

À Universidade, ao Laboratório de Máquinas Elétricas e aos professores pela infraestrutura e auxílio na realização deste projeto.

À namorada pela compreensão e apoio ao longo da vida acadêmica e da realização deste trabalho.

Sumário

1. Introdução	10
2. Objetivo.....	12
3. Justificativa	13
4. Legislação Relativa à GD.....	16
5. Normas para Relés de Proteção.....	17
6. Requisitos	18
6.1. Obrigatórios	18
6.2. Desejáveis	18
7. Princípio de Funcionamento.....	19
7.1. Comportamento transitório da potência em caso de falta	20
8. Alternativas de Solução	22
8.1. Aquisição de sinal e desacoplamento.....	22
8.1.1. Medição de corrente.....	22
8.1.2. Medição de tensão	23
8.2. Processamento do ângulo.....	24
8.2.1. Estimativa do ângulo a partir das potências média e aparente:	24
8.2.2. Medição do ângulo por cruzamento de zero	25
9. Topologia Proposta	26
9.1. Divisor Resistivo.....	26
9.1.1. Dimensionamento do Divisor Resistivo	27
9.2. Desacoplamento Ótico	27
9.2.1. Medição de tensão	27
9.2.2. Medição de corrente.....	31
9.3. Filtro para atenuação de harmônicos.....	32
9.4. Comparador de tensão para detecção de zero	35
10. Processamento dos sinais	37
10.1. <i>Hardware</i>	37
10.1.1. Escolha do processador.....	37
10.2. <i>Software</i>	38
10.2.1. Utilização dos <i>timers</i>	38
10.2.2. Interrupções por borda	39

10.2.3.	Cálculo de ângulo e frequência	40
10.2.4.	Atuação em caso de anormalidade.....	41
11.	Protótipo	43
12.	Ensaio Realizado	46
12.1.	Ensaio inicial	46
12.1.1.	Testes com cargas variadas	46
12.1.2.	Teste de resposta do filtro	46
12.2.	Medição de frequência	47
12.3.	Deteção de potência reversa	48
12.3.1.	Análise das formas de ligação.....	48
12.3.2.	Ligação do dispositivo à PCE.....	52
12.3.3.	Ensaio Realizado	53
13.	Conclusões	56
14.	Bibliografia	57
	Anexos	58
	Anexo A – Diagrama do Circuito em MicroCap	59
	Anexo B – Fluxograma básico do software	61
	Anexo C – Código fonte do software	63
	Anexo D – Layout e esquemático das placas em Eagle CAD.....	73
	Anexo E – Tabela completa dos ensaios realizados na PCE.....	77
	Anexo F – Exemplo de diagrama de proteções para geradores	79

Lista de Figuras

Figura 1 – Gráfico da corrente atrasada em 30 graus em relação à tensão	19
Figura 2 – Gráfico da corrente atrasada em 120 graus em relação à tensão	19
Figura 3 – Diagrama potência reversa	20
Figura 4 – Diagrama do circuito proposto	26
Figura 5 – Divisor resistivo	26
Figura 6 – Circuito de desacoplamento ótico	29
Figura 7 – Topologia do filtro utilizado	34
Figura 8 – Diagrama de Bode do filtro utilizado	34
Figura 9 – Atraso de grupo do filtro utilizado	35
Figura 10 – Forma de onda na saída do comparador	35
Figura 11 – Circuito de comparação do sinal	36
Figura 12 – Diagrama de montagem do protótipo	43
Figura 13 - Placas confeccionadas para o protótipo	44
Figura 14 - Protótipo montado.....	45
Figura 15 – Diagrama de tensões e correntes trifásicas em delta	49
Figura 16 - Diagrama fasorial da corrente de fase.....	50
Figura 17 - Diagrama de ligação do relé direcional.....	52
Figura 18 - Esquema de ligação para o ensaio	53
Figura 19 - Ensaio PCE com analisador Fluke	54

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de frequência.....	47
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de leitura direção da potência	55

1. Introdução

Na forma convencional de geração de energia, a geração centralizada, onde é utilizada uma grande fonte geradora como em termelétricas ou hidrelétricas, são necessárias linhas de transmissão e distribuição para que a energia chegue até o consumidor final. Já na chamada Geração Distribuída (GD), a necessidade de linhas de transmissão é minimizada porque pequenas fontes de geração de energia são instaladas próximas à carga, evitando assim, todos os custos e impactos inerentes à geração centralizada.

A importância da GD no atendimento às necessidades de energia elétrica começou a se destacar nas últimas décadas, quando muitos países optaram pelo regime de competição nesse setor e passaram a incentivar a evolução de tecnologias de geração com eficiência e confiabilidade crescentes, também em baixas potências. No caso do Brasil, a operação desse sistema só teve início na década de 90 com a reforma do setor elétrico e, mais recentemente, com a normalização através das resoluções da ANEEL a partir de 2006.

Neste cenário, tecnologias que viabilizem a conexão de pequenos empreendimentos à rede de distribuição são fundamentais para o crescimento desse tipo de geração, porém a grande maioria dos dispositivos com esta finalidade encontrados hoje no mercado brasileiro são de origem estrangeira, contribuindo desta forma para o aumento preço de construção de micro-centrais geradoras e, consequentemente, dificultando a viabilização econômica das mesmas.

Um destes dispositivos é o relé direcional de potência, foco deste trabalho. Este dispositivo visa impedir a potência de fluir no sentido inverso, evitando o que é chamado de motorização do gerador. Nestes casos o gerador deixa de gerar energia elétrica e passa consumir potência da rede comportando-se como um motor, podendo gerar instabilidade no sistema de distribuição local. Este tipo de problema pode ser ocasionado por uma falha na máquina primária, onde esta por algum motivo deixa de fornecer energia ao gerador elétrico.

Este dispositivo, depois de concluído, pode facilmente servir de base para outros relés de proteção também exigidos pela ANEEL, como relé de sobre/sub frequência e de falta de fase, por exemplo, já que a aquisição dos dados necessária nestes casos é semelhante à que foi desenvolvida.

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo de proteção para micro-centrais geradoras de energia elétrica definido como relé de potência reversa. Este relé tem por função impedir que o gerador seja motorizado pela rede de distribuição da concessionária, ou seja, este deve garantir que o fluxo de potência sempre irá fluir no sentido gerador/rede de distribuição, e nunca o contrário. Por se tratar de um projeto para aplicação local, este relé deve atender às normas brasileiras para proteção e interconexão de sistemas de geração distribuída de pequeno porte.

Devem ser estudadas também as normas internacionais a respeito dos limites para os tempos de atuação deste tipo de dispositivo, bem como limites de erro e condições mínimas de operação para que possam ser estabelecidos os requisitos do projeto.

3. Justificativa

Os investimentos para o aumento da capacidade instalada no setor elétrico brasileiro têm colocado a geração distribuída como alternativa às tradicionais soluções. A conexão de GD possibilita o alívio do carregamento do sistema elétrico, permitindo à concessionária postergar investimentos para compra de novos equipamentos e construção de subestações e alimentadores. Além disto, instalações de GD podem operar isoladas e utilizadas em locais onde plantas centralizadas tornam-se inviáveis e reduzir as perdas do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Três tendências independentes estão formando a base para a introdução difundida da geração descentralizada no Brasil: a reestruturação do setor energético, a necessidade do aumento de capacidade do sistema e os avanços tecnológicos dos acionadores primários. A GD refere-se à geração elétrica em pequena escala para consumidores interligados ou isolados, englobando os segmentos industrial, comercial e residencial.

Segundo o Plano Decenal de Energia (PDE 2009) da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), é projetado um crescimento da demanda de energia elétrica de 5,1% ao ano no período de 2010-2019, o que torna necessário agregar o equivalente a aproximadamente 6.300 MW de nova capacidade ao ano nos próximos 10 anos. Já o PDE 2008 prevê um incremento de 11,2% ao ano na autoprodução até 2017, acima da média histórica de 8% ao ano registrada entre 1991 e 2007. Segundo a EPE 7,1% da energia nacional era oriunda da autoprodução em 2008.

Tendo em vista o crescimento significativo da demanda de energia elétrica previsto, vinculado à evolução das tecnologias para GD no Brasil, esta se tornará uma solução para expandir a oferta de energia, a exemplo do que aconteceu em outros países. No Brasil, o PROINFA tem como um de seus objetivos, a ampliação das fontes renováveis de pequeno porte até que atinjam um total de capacidade instalada de 10% do consumo anual do país de energia elétrica, objetivo a ser atendido até 2024. Em consonância com o PROINFA a legislação vigente incentiva a compra de energia de fontes alternativas de pequeno porte e desonera os impostos para os produtores de energia a partir destas. Caracterizando estes incentivos, pode-se citar a Lei nº 12.305, de dois de agosto de 2010, a qual Incentiva a recuperação e o aproveitamento energético de

resíduos sólidos urbanos e o projeto de lei, PLS 311 de 2009, que está em tramitação no Senado, “Institui o Regime Especial de Tributação para o Incentivo ao Desenvolvimento e à Produção de Fontes Alternativas de Energia Elétrica - REINFA e estabelece medidas de estímulo à produção e ao consumo de energia limpa”. Deve-se ressaltar ainda que somente poderão participar da Chamada Pública do PROINFA em sua segunda etapa, produtores que comprovem um grau de nacionalização dos equipamentos e serviços de, no mínimo, noventa por cento em cada empreendimento.

Ainda na legislação brasileira, devido à lei LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos), os estados e municípios deverão possuir metas para reaproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos. Sendo assim, estes serão responsáveis por um aumento significativo na demanda por sistemas de GD para aproveitamento energético do biogás, num horizonte máximo de quatro anos observado o disposto na lei em vigor.

No Brasil existe ainda o problema das comunidades localizadas em áreas remotas ou isoladas, onde se torna difícil a construção e acesso de linhas de transmissão ou distribuição. Estas podem ser beneficiadas pela geração distribuída, pelo fato de a usina estar próxima à carga. Segundo SCHELEDER (1998), existe um mercado potencial representado por três milhões de propriedades rurais e mais de 100.000 comunidades não atendidas por eletricidade, com população média estimada em 150 habitantes por localidade, que não dispõem da energia necessária ao efetivo atendimento de suas demandas básicas. Este quadro requereria para o seu completo atendimento, a instalação de 15 a 20 mil MW de energia elétrica, com um investimento estimado em R\$ 25 bilhões. Com essa ordem de grandeza, o mercado potencial do meio rural e das regiões isoladas brasileiras seria comparável à expansão prevista para os sistemas elétricos convencionais interligados nos próximos 10 anos.

Do ponto de vista técnico, o relé direcional de potência é necessário para a proteção da rede, do gerador e da máquina primária. Supondo um caso onde a alimentação de combustível é demasiadamente reduzida em um grupo gerador a gás de pequeno porte, por exemplo, possivelmente este não terá mais condições de entregar energia à carga. Caso este gerador seja uma máquina de indução em velocidade sobressíncrona operando interligado à rede de distribuição, a velocidade da máquina primária certamente cairá para valores abaixo da velocidade síncrona de seu campo

girante o que acarretará no funcionamento da máquina de indução como um motor. Esta situação pode gerar danos à máquina elétrica e à rede, pois estas podem ser submetidas a valores de potência acima dos valores nominais, já que o gerador deixará de ser fonte de energia elétrica para tornar-se carga elétrica para a rede.

A máquina primária, em algumas situações, também pode sofrer danos com esta motorização. Um exemplo é a motorização de uma turbina hidráulica, que pode submeter esta a esforços para os quais ela não foi projetada.

É importante ressaltar ainda que a proteção contra potência reversa é necessária independente do tipo de máquina ou do porte do gerador.

4. Legislação Relativa à GD

A legislação que regulamenta os sistemas de Geração Distribuída, permitindo o acesso de pequenos aproveitamentos com a rede de distribuição, é recente, tendo sido publicada no segundo semestre de 2009. As principais leis e resoluções normativas pertinentes ao setor de GD com fontes alternativas renováveis de energia no Brasil são as seguintes:

O Decreto nº 5025 de 30 de março de 2004 regulamenta o PROINFA, que é o Programa de Incentivo à Fontes Alternativas de Energia Elétrica, e visa diversificar a matriz energética nacional através de fontes alternativas como geração eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas.

O Decreto nº 5163 de 30 de julho de 2004 “regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências”;

A Resolução Normativa 390 de 15 de dezembro de 2009 da ANEEL “estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de usinas termelétricas e de outras fontes alternativas de energia, os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida e dá outras providências”;

A Resolução Normativa 395 de 15 de dezembro de 2009 da ANEEL “aprova a Revisão 1 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, e dá outras providências”;

Conforme as informações acima citadas, pode-se concluir que a GD a partir de fontes alternativas renováveis foi regulamentada recentemente no País. Sem o estabelecimento desses requisitos legais, as concessionárias de energia não permitiam o acesso à rede de distribuição para centrais geradoras de pequeno porte e, portanto, inibiam existência de empreendimentos e o desenvolvimento de tecnologias neste setor.

5. Normas para Relés de Proteção

As principais normas nacionais e internacionais que regulamentam os relés de proteção para dispositivos elétricos, bem como suas condições de uso e métodos de testes encontram-se listadas abaixo. Nenhuma das normas utilizadas como referência para este trabalho trata-se especificamente de relés direcionais de potência, mas sim estabelecem requisitos gerais, e em alguns casos, abordam este tipo de relé dentre outros na mesma norma.

- **NBR 9029** - Emprego de relés para proteção de barramento em sistema de potência. Fixa condições exigíveis para o emprego de relés e dispositivos associados, para a proteção de barramento de sistemas elétricos de potência.
- **IEEE C37.2** - 2008 - Standard for Electrical Power System Device Function Number. Estabelece números para as funções de proteção executadas por dispositivos em sistemas de potência, subestações e sistemas de geração
- **IEEE C37.90** - 2005 - Relay System Associated With Electric Power Apparatus. Estabelece condições de uso elétricas e térmicas e requisitos para testes de relés utilizados para proteção de dispositivos elétricos
- **IEEE C37.96** - 2000 - AC Motor Protection. É um guia de métodos geralmente aceitos para proteção de motores AC, baseando-se no porte e na aplicação.
- **IEEE 1547.1** - 2005 - IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. Estabelece os tipos de testes e como estes devem ser feitos para atestar que o equipamento está em conformidade com a IEEE 1547.

6. Requisitos

Os requisitos estabelecidos para o dispositivo em questão são apresentados como segue:

6.1. Obrigatórios

- **Deteção da direção do fluxo de potência (função 32- IEEE C37.2 – 2008);**
 - Medição a partir do ângulo entre tensão e corrente.
 - Utilização do cruzamento de zero dos sinais para medição de tempo.
 - Disparo do relé com $-90^\circ > \theta > -270^\circ$ sendo θ o ângulo entre tensão e corrente.
- **Função para ajuste do tempo de retardo no disparo.**
- **Função para ajuste da corrente mínima reversa considerada.**
- **Tensão aceitável de 380V RMS.**
- **Corrente aceitável de 60A RMS.**

6.2. Desejáveis

- **Frequência:**
 - Leitura de frequência.
 - Atuação do relé em caso de sobrefrequência.
 - Atuação do relé em caso de subfrequência.
- **Tensão e Corrente;**
 - O sistema deve estar preparado para receber futura leitura de tensão e corrente.
- **Deteção de falta de fase.**

7. Princípio de Funcionamento

O relé de potência reversa, ou relé direcional de potência, deve ser capaz de detectar a direção do fluxo de potência em um circuito de corrente alternada trifásico. Esta função é executada através da análise do ângulo entre tensão e corrente ϕ , como exemplo nas figuras 1 e 2.

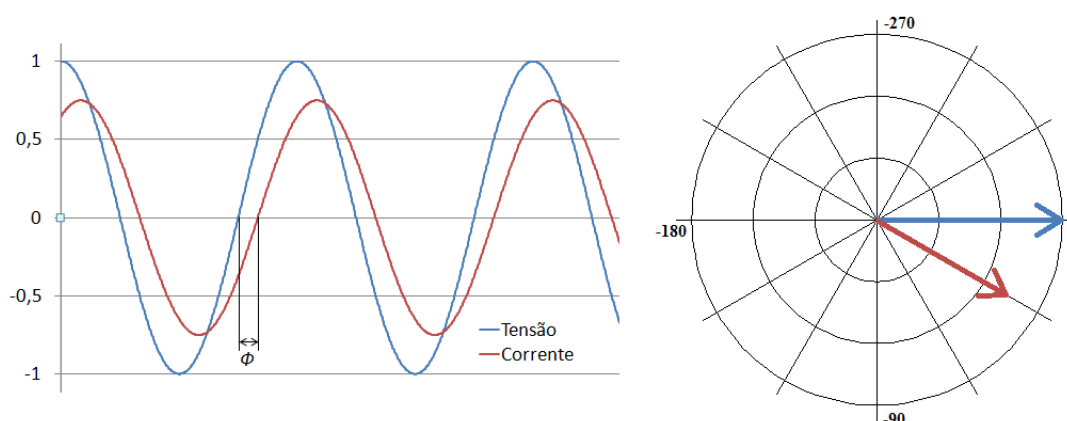


Figura 1 – Gráfico da corrente atrasada em 30 graus em relação à tensão

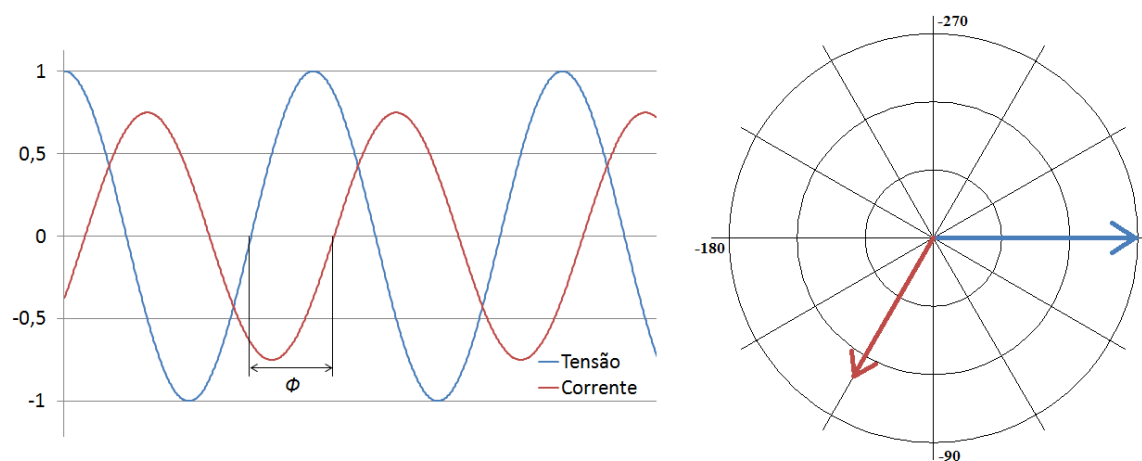


Figura 2 – Gráfico da corrente atrasada em 120 graus em relação à tensão

Na figura 1 temos um exemplo onde a corrente está atrasada em relação à tensão em trinta graus, o que seria um circuito com um fator de potência indutivo. Já na figura 2, a corrente está cento e vinte graus atrasada em relação à tensão, o que indica que

certamente a potência ativa é uma grandeza negativa, ou seja, está fluindo em sentido contrário ao usual e entregando potência à rede.

Considerando um circuito trifásico em delta equilibrado, temos:

$$P_{trif} = 3V_{linha}I_{fase}\cos(\phi) \quad (7.1)$$

onde ϕ é o ângulo entre a tensão de linha e a corrente de fase.

Considerando que a tensão e a corrente são valores RMS, a única forma de obtermos uma potência negativa pela equação 7.1 é com um cosseno de ϕ menor que zero. Logo, para que isso aconteça temos a seguinte condição: $90^\circ < \phi < 270^\circ$. Essa condição está descrita na figura 3

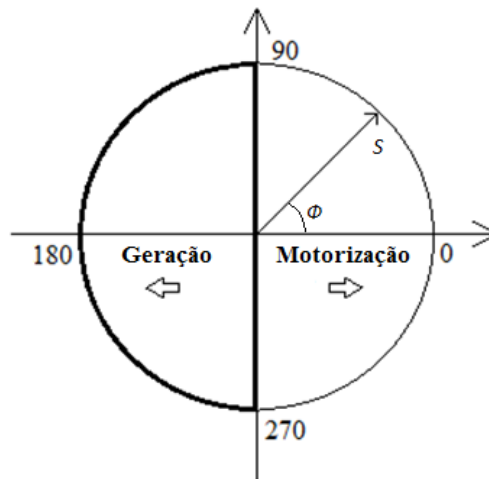


Figura 3 – Diagrama potência reversa

Logo, assim que o fasor resultante entrar na região chamada de “Motorização” na figura 3 tem-se uma componente de potência ativa positiva, o que indica que a potência está fluindo da rede para o gerador.

7.1. Comportamento transitório da potência em caso de falta

Em caso de faltas do tipo fase-terra, por exemplo, podem acontecer variações angulares transitórias onde o ângulo ϕ ultrapassa o limite estabelecido para o disparo do relé de potência reversa. Por esse motivo, o relé deve ter uma margem de segurança nos seus limites de atuação, não atuando no limiar entre geração de energia ou consumo de energia pela planta. É interessante também que o dispositivo possua opções que

permitam a temporização, tanto para evitar disparos em situações transitórias como para que o dispositivo possa ser utilizado como proteção de retaguarda de algum outro relé direcional de potência.

8. Alternativas de Solução

Existem diversos métodos para a leitura de ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente em um circuito de potência, incluindo alguns eletromecânicos. Grande parte destas soluções passa por uma etapa de desacoplamento e rebaixamento da tensão, e depois disso o processamento do sinal, seja este feito de forma digital ou analógica.

8.1. Aquisição de sinal e desacoplamento

8.1.1. Medição de corrente

Na etapa de aquisição de sinal comumente são utilizados transformadores de corrente (TCs), por serem dispositivos que, além de promover o desacoplamento da medição, também podem adequar a magnitude do sinal aos valores geralmente aceitos pelos instrumentos de medição. Estes dispositivos tem como vantagem a sua larga implementação em sistemas de potência, porém estes estão sujeitos à saturação caso o sinal ultrapasse o limite especificado de forma transitória, podendo gerar distorções no sinal de saída. Outra desvantagem é que o uso de TCs não elimina a necessidade de circuitos eletrônicos de condicionamento do sinal para que este possa ser utilizado, uma vez que este necessita do uso de um resistor shunt para fechar o circuito.

É importante salientar que como o TC é um elemento indutivo, este pode gerar uma defasagem no sinal de corrente adquirido. Somando esta defasagem inserida pelo TC à defasagem já existente no circuito, será gerado um erro no resultado final da medição de ângulo feita pelo instrumento.

A inserção de resistores shunt diretamente na carga também é uma opção para a medição de corrente, porém estão limitados pela potência que podem dissipar, bem como pela precisão do valor da resistência. Este tipo de medição necessita de um circuito ou dispositivo para desacoplamento, uma vez que a referência da medição da queda de tensão sobre o resistor shunt está inserida diretamente no circuito de potência. Por isso comumente são utilizados resistores shunt associados aos TCs, uma vez que estes promovem o desacoplamento e a redução do valor de corrente, reduzindo também a potência dissipada pelo resistor. Juntamente com resistores shunt pode ser utilizado também um circuito de desacoplamento ótico, utilizando um opto-acoplador linear.

Porém, neste caso, o circuito estará limitado pela corrente máxima suportada pelos resistores shunt.

Para medição de corrente podem ser utilizadas ainda ponteiras de efeito Hall, que apresentam em geral boa precisão e, por não possuírem contato elétrico com o circuito, também promovem o desacoplamento do sinal. Porém, estas apresentam alto custo devido ao circuito de amplificação necessário para a aquisição do sinal de saída do sensor de efeito hall.

8.1.2. Medição de tensão

No caso da tensão podem ser utilizados TPs para rebaixar a magnitude do sinal para valores aceitáveis. Assim como os TCs, estes transformadores também promovem o desacoplamento do sinal, evitando possíveis problemas de referência, e são largamente aplicados em sistemas de potência, tanto para sistemas de medição como para sistemas de proteção.

Porém, dificilmente um TP irá rebaixar a tensão a ponto de esta poder ser utilizada em um circuito eletrônico ou em um conversor analógico-digital, por exemplo. Portanto geralmente são empregados divisores resistivos para rebaixar ainda mais a tensão, tornando mais simples e barato o processamento do sinal adquirido. Os divisores têm como desvantagem o fato de estarem sujeitos a variações térmicas, bem como o próprio erro dos resistores já associar uma incerteza na medição, porém é um método bastante simples e muito eficaz para a redução da tensão, utilizado inclusive em ponteiras de osciloscópio. Novamente, assim como o TC, deve-se levar em conta que o TP é um elemento indutivo e pode gerar uma defasagem no sinal adquirido, inserindo assim um erro na medição final de ângulo.

Outra alternativa é a utilização de divisores resistivos diretamente no circuito a ser medido, sem o uso de TPs, porém, neste caso, deve-se atentar a tensão máxima suportada por cada resistor. É importante também que o divisor resistivo seja projetado de forma a minimizar a corrente consumida, o que diminui o aquecimento dos resistores e, conseqüentemente, os erros por variação térmica. Caso não sejam usados TPs, também é necessário o uso de um circuito de desacoplamento, que, assim como no caso da medição de corrente, pode ser um acoplamento ótico utilizando opto-acopladores lineares.

8.2. Processamento do ângulo

Após etapa de aquisição e condicionamento dos sinais de tensão e corrente a etapa de processamento do ângulo apresenta basicamente duas alternativas: medição de ângulo por cruzamento de zero, ou estimativa do ângulo a partir da medição das potências média e aparente.

8.2.1. Estimativa do ângulo a partir das potências média e aparente:

O fator de potência de uma carga é dado por:

$$FP = \frac{P_{Med}}{P_{Ap}} \quad (8.1)$$

Onde

$$P_{Ap} = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (8.2)$$

$$P_{Med} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (8.3)$$

Neste caso, porém, deve ser levado em conta o conteúdo harmônico das correntes gerado por cargas como motores, geradores e transformadores, que podem apresentar saturação do núcleo de ferro-silício, por exemplo. Se considerada uma tensão senoidal, pode-se afirmar que o conteúdo harmônico da corrente não gera potência útil, apenas reativos. Neste caso, onde a grandeza a ser calculada é o ângulo ϕ , para a obtenção da potência aparente deve ser considerada apenas a componente fundamental da corrente, e sendo assim, passa-se a calcular o fator de deslocamento, ao invés do fator de potência.

Por definição, o fator de deslocamento, por ser calculado considerando apenas a componente fundamental considera apenas a defasagem entre tensão e corrente, já o fator de potência considera, além desta defasagem, as distorções harmônicas presentes na corrente.

Para que este tipo de estimativa possa ser feita por um dispositivo eletrônico em tempo real, uma das alternativas é a aquisição do sinal já condicionado através de conversores analógico-digitais (A/Ds) e o posterior processamento utilizando um dispositivo computacional dedicado. Este dispositivo deverá fazer o cálculo das tensões e correntes RMS através da integração destes sinais, bem como o cálculo da potência ativa também através da integral mostrada acima. Para este tipo de cálculo é necessário

um poder processamento maior que os microcontroladores atuais oferecem, sendo necessário um processador mais avançado.

8.2.2. Medição do ângulo por cruzamento de zero

A medição do ângulo por cruzamento de zero é um método mais simples, porém menos seguro, para a aquisição desta grandeza. Neste método um circuito gera um pulso para cada vez que os sinais de tensão e corrente cruzam o zero e a partir destes pulsos um processador conta o tempo de defasagem.

A partir do tempo pode-se calcular o ângulo conforme equações abaixo:

$$\phi = t_d \frac{T}{360} \quad (8.4)$$

Sendo t_d o tempo entre o cruzamento de zero e T o período da oscilação da tensão.

Este método torna-se menos confiável quando são consideradas cargas não lineares, que geram distorções harmônicas. Essas distorções podem alterar o ponto de cruzamento de zero dos sinais, gerando erros nas medições bastante significativos.

Uma das alternativas para aumentar a confiabilidade deste método é a utilização de filtros analógicos para remover o conteúdo harmônico, porém os filtros possuem um atraso de grupo e, portanto, devem ser iguais para a corrente e para a tensão.

9. Topologia Proposta

A topologia proposta neste trabalho é simplificada de forma a diminuir a necessidade de processamento sobre o sinal adquirido, portanto a medição de ângulo é feita através do cruzamento de zero. Para maior entendimento o circuito foi dividido em etapas simples, como consta na figura abaixo.



Figura 4 – Diagrama do circuito proposto

9.1. Divisor Resistivo

A primeira etapa do circuito é composta por um divisor resistivo de forma a rebaixar a tensão da rede para valores da ordem de 1 a 2 por cento da tensão original. Para isto serão utilizados resistores de precisão, tendo em vista que alterações nos valores das resistências afetam diretamente os valores medidos. A Figura 5 demonstra o esquemático do divisor resistivo bem como o circuito de adição de offset ao sinal, que é necessário para evitar que os sinais de entrada assumam valores negativos que não poderão ser transmitidos pelo opto-acoplador posteriormente.

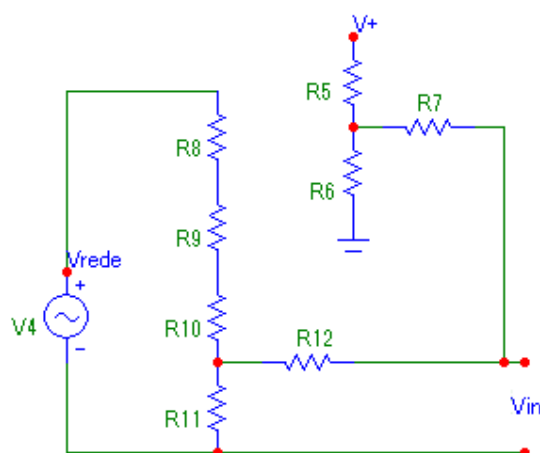


Figura 5 – Divisor resistivo

9.1.1. Dimensionamento do Divisor Resistivo

Partindo-se da topologia proposta é necessário estabelecer os limites de funcionamento do sistema para fazer o equacionamento do divisor de resistivo. A tensão de funcionamento é dada pela tensão de linha da rede, que é 380 volts na grande maioria do Brasil. Logo,

$$V_{pico} = 220 * \sqrt{3} * \sqrt{2} = 538,89V \quad (9.1)$$

Considerando uma variação possível da rede de 5% para cima, que seria o pior caso de funcionamento, obtém-se:

$$V_{max} = 538,83V * 1,05 = 565,83V \quad (9.2)$$

Para a leitura deste valor, estabeleceu-se um divisor de tensão com os seguintes valores de resistência: 100kΩ, 100kΩ, 78,7kΩ e 4,22kΩ. Estes valores foram determinados com base na queda limite de tensão sobre os mesmos e nos valores disponíveis para resistores de 1% de precisão.

$$i_{divisor} = \frac{565,83V}{(100k\Omega + 100k\Omega + 78,7k\Omega + 4,22k\Omega)} = \frac{565,83V}{282,92k\Omega} = 2mA \quad (9.3)$$

A tensão de pico sobre os resistores do divisor de tensão fica da seguinte forma:

$$V_{resistor\ max} = 100k\Omega * 2mA = 200V \quad (9.4)$$

Como os resistores têm um limite máximo de tensão 250V, estamos dentro do limite aceitável de tensão.

A saída do divisor será a tensão diferencial sobre o resistor de 4,22kΩ. Logo,

$$V_{R\ 4,22k\Omega\ max} = 2 * 4,22k\Omega * 2mA = 16,88V_{pico-pico} \quad (9.5)$$

9.2. Desacoplamento Ótico

9.2.1. Medição de tensão

Um ponto bastante crítico na medição de tensões elevadas é o desacoplamento entre o circuito de medição e a fonte de tensão. Geralmente em medições que envolvem tensões da rede de distribuição a referência dos sinais torna-se um problema, especialmente quando não se dispõe de um condutor neutro nas ligações. Comumente

são utilizados transformadores de potencial (TPs) desacoplar e rebaixar a tensão para níveis de medição aceitáveis, especialmente quando os relés de proteção são instalados em subestações da rede de distribuição de energia elétrica, onde são encontradas tensões mais elevadas, da ordem de 13,8kV ou maiores.

Como este trabalho tem foco em sistemas que já utilizam tensões compatíveis com o secundário do sistema de distribuição (220/380V) as medições podem ser feitas diretamente sem o uso de TPs, mas, por questões de segurança, o circuito deve ser desacoplado da rede. Para este fim foram utilizados opto-acopladores analógicos, também chamados de opto-acopladores lineares.

Opto-acopladores são componentes que utilizam um LED para envio do sinal em forma de luz e um foto-transistor ou foto-diodo para a recepção e transdução do mesmo em um sinal elétrico novamente. Como os dados são transmitidos via luz, não há conexão elétrica entre os dois lados do opto-acoplador, permitindo que fontes completamente isoladas entre si sejam usadas nas duas partes do circuito. Porém, este tipo de acoplamento é utilizado apenas para sinais digitais uma vez que as não linearidades do diodo emissor e do receptor geram distorções grandes em sinais analógicos.

Já os opto-acopladores analógicos utilizam um circuito externo para a linearização da resposta do LED e do foto-diodo. O encapsulamento destes é composto por um foto-emissor e dois foto-receptores, de forma que um dos foto-receptores é utilizado como realimentação para um amplificador operacional externo que gera o sinal para o LED. Como o opto-acoplamento é feito dentro de um sistema realimentado, este irá linearizar o sinal de saída em relação ao sinal de entrada. A topologia para a ligação deste tipo de acoplamento pode ser visto na Figura 6.

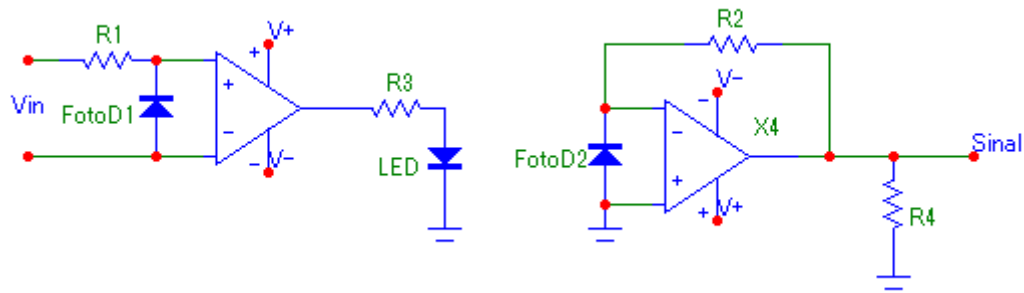


Figura 6 – Circuito de desacoplamento ótico

Na Figura 6, os foto-diodos D1 e D2 encontram-se no mesmo encapsulamento do LED e são iluminados por este de forma igual.

O componente escolhido para fazer este acoplamento é o HCNR200, produzido pela empresa Agilent. Segundo o fabricante, este componente oferece uma resposta de saída com linearidade de até 0,1% em relação à entrada.

9.2.1.1. Equacionamento do Circuito de Desacoplamento

Algumas características do componente escolhido são necessárias para o equacionamento do circuito:

Corrente nos Foto-diodos:

$$I_{FD1,FD2} = 0,005I_{LED} \text{ (Típico)} \quad (9.6)$$

Relação entre os foto-diodos:

$$I_{FD1} = I_{FD2}k \text{ (} k = 1 \text{ - Típico)} \quad (9.7)$$

Queda de tensão no LED:

$$V_{LED} = 1,6V \text{ (Típico)} \quad (9.8)$$

Tensão reversa máxima no LED:

$$V_{Rev.max.LED} = 2,5V \text{ (Mínimo)} \quad (9.9)$$

Para o equacionamento, a corrente presente no ramo de offset é desconsiderada, uma vez que esta tem como função elevar a tensão senoidal de entrada para valores

apenas positivos. Sendo assim, se considerarmos a entrada como um sinal já elevado acima de zero, estaremos implicitamente considerando a corrente de offset.

O resistor de entrada R_{in} a ser considerado é a soma de R1 e R12 nos circuitos das figuras 5 e 6.

Pela alta impedância de entrada no amplificador operacional, considera-se que a corrente de entrada deve ser igual à corrente do foto-diodo de realimentação.

$$I_{FD1} = I_{Rin} = V_{in}/R_{in} \quad (9.10)$$

Como já citado, a corrente no foto-diodo é igual a 0,5% a corrente no LED, logo

$$I_{FD1max} = 0,005I_{LEDmax} \quad (9.11)$$

Das equações anteriores 9.10 e 9.11, aplicando valores limites, vem:

$$R_{in\ min} = \frac{V_{in\ max}}{0,005I_{LEDmax}} \quad (9.12)$$

Aplicando os valores já obtidos e estabelecendo uma corrente limite no LED emissor de 10mA:

$$R_{in\ min} = \frac{16,88V}{10mA \cdot 0,005} = \frac{16,88V}{50\mu A} = 337,6k\Omega \approx 330k\Omega \quad (9.12a)$$

Tendo o R_{in} , pode-se agora calcular o ganho do circuito para estabelecer o resistor de saída do circuito.

9.2.1.2. Equacionamento do ganho do opto-acoplador

Novamente pela alta impedância do amplificador operacional (AO), temos que a corrente do foto-diodo de entrada é igual à corrente de entrada do circuito. Igualmente, no ramo de saída a corrente do foto-diodo de saída é igual à corrente sobre o resistor de realimentação. Equacionando temos:

$$V_{in} = I_{Rin}R_{in} = I_{FD1}R_{in} \quad (9.13)$$

$$V_o = I_{R_2}R_2 = I_{FD2}R_2 \quad (9.14)$$

O ganho de um circuito é dado pela relação entre as tensões de entrada e saída. Logo,

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (9.15)$$

Aplicando 13 e 14 em 15, obtém-se

$$G = \frac{I_{FD2}R_2}{I_{FD1}R_{in}} \quad (9.16)$$

Pela relação k entre as correntes dos foto-diodos apresentada na equação 9.7, vem

$$G = \frac{kI_{FD1}R_2}{I_{FD1}R_{in}} = \frac{kR_2}{R_{in}} \quad (9.17)$$

Como o k típico é unitário, a equação do ganho aproximado é

$$G \approx \frac{R_2}{R_{in}} \quad (9.18)$$

Como calculado anteriormente a partir da corrente máxima do foto-diodo, o R_{in} deve ser de 330k Ω , logo, para ganho de aproximadamente um no circuito o R_2 deve ser deste mesmo valor.

9.2.2. Medição de corrente

Para a medição de corrente, existem duas alternativas comumente utilizadas: Queda de tensão sobre uma resistência conhecida (shunt) ou sensor de efeito hall. Neste trabalho, pela simplicidade do método, será medida a corrente através da queda de tensão em uma resistência.

Para a utilização de uma resistência shunt é necessário que esta tenha um valor estável e que seja pequena o suficiente para não influenciar no circuito original. A partir dessa necessidade, foi feita uma busca por componentes que atendam a estes pré-requisitos. Foi selecionada uma resistência de 1m Ω , com capacidade de suportar correntes de até 90 Ampères, sem o uso de TCs. Neste caso, o uso de TCs será necessário apenas para correntes maiores, possibilitando uma possível redução de custos para aplicações de menor porte até cerca de 30kW.

Para a medição da queda de tensão sobre a resistência shunt foi utilizado um circuito semelhante ao já projetado para a medição de tensão da rede, também utilizando um opto-acoplador linear para desacoplamento. Neste caso, é necessário apenas que os resistores de entrada e de ganho e o circuito de offset sejam recalculados para trabalhar com tensões menores.

9.2.2.1. Equacionamento do Circuito de Leitura de Corrente

Para os equacionamentos do circuito de leitura de corrente são utilizados basicamente os mesmos componentes e topologia da leitura de tensão, figura 6, logo, as limitações estabelecidas para as correntes e tensões seguem o mesmo equacionamento, alterando-se apenas a magnitude do sinal de entrada.

O resistor de entrada R_{in} deve ser calculado com base na corrente máxima de entrada e na máxima tensão de pico gerada pelo resistor *shunt*. Como no cálculo do resistor de entrada do circuito anterior (leitura de tensão), pela alta impedância de entrada no amplificador operacional, considera-se que a corrente de entrada deve ser igual à corrente do foto-diodo de realimentação, equações 9.10 e 9.11. Para obter a tensão máxima que será encontrada sobre o resistor temos:

$$V_{shunt} = I_{max} R_{shunt} \quad (9.19)$$

$$V_{shunt} = 90A * 1m\Omega = 90mVp \quad (9.20)$$

A corrente utilizada para o cálculo é a maior corrente suportada pelo resistor shunt. Aplicando o resultado da eq. 9.20 e estabelecendo uma corrente limite no LED emissor de 10mA:

$$R_{in\ min} = \frac{2*90mVp}{10mA*0,005} = \frac{180mVpp}{50\mu A} = 5,09k\Omega \approx 5,6k\Omega \quad (9.21)$$

Tendo o R_{in} , pode-se agora calcular o ganho do circuito, onde pode ser utilizado o mesmo equacionamento do circuito de leitura de tensão. Como a tensão de entrada é de 90mV, um ganho de 40 vezes é um valor interessante, apresentando uma saída com amplitude de 8Vpp.

Sendo assim, pode-se estabelecer o resistor do estágio de saída a partir do ganho desejado e do resistor de entrada, conforme eq. 9.22.

$$G \approx \frac{R_2}{R_{in}} \rightarrow R_2 = GR_{in} \quad (9.22)$$

$$R_2 = 40 * 5,6K\Omega \approx 220k\Omega \quad (9.22a)$$

9.3. Filtro para atenuação de harmônicos

Como citado no capítulo de alternativas de solução é importante o uso de um filtro para a atenuação de harmônicos de corrente, já que estas estão presentes em grande parte das cargas utilizadas atualmente.

Para dimensionamento do filtro foi utilizada uma ferramenta de software chamada Filter-Pro, fornecida pela Texas Instruments. Neste caso, é necessário estabelecer as especificações do filtro e o tipo de topologia a ser gerada. Como é interessante uma resposta plana em torno de 60Hz, o filtro butterworth é indicado por oferecer um baixo ripple na banda de passagem. A frequência de corte idealmente deveria ser o mais perto de 60Hz quanto possível, porém isso implicaria em um filtro mais complexo e com mais estágios. Por esse motivo, o ponto de corte do filtro deve ser especificado em um ponto mais afastado 60Hz mas ainda assim sem afetar o desempenho do circuito, visando uma melhor relação custo/benefício. Levando em conta estes aspectos, a frequência de corte deve ficar sobre 120Hz para que ainda se obtenha uma atenuação satisfatória da primeira harmônica.

Especificações escolhidas:

- Filtro ativo passa-baixa de segunda ordem.
- Filtro tipo butterworth, pela linearidade na banda de passagem.
- Filtro com estágio único.
- Ganho = 1 (0 dB) para a banda de passagem.
- Frequência de passagem de 60Hz.
- Ripple máximo de 3dB na banda de passagem.
- Frequência de corte de 120Hz.
- Atenuação na frequência de corte de 15dB.

O circuito do filtro resultante encontra-se na figura abaixo:

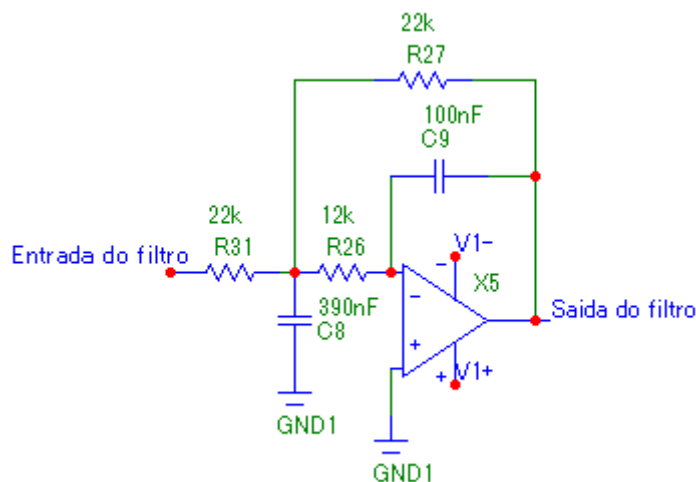


Figura 7 – Topologia do filtro utilizado

A resposta calculada para esse filtro encontra-se nas figuras abaixo. Pode-se observar que o que os requisitos de atenuação de 15dB em torno da primeira harmônica são teoricamente atendidos.

Neste caso específico, o atraso de fase e de grupo pode afetar a medição de ângulo caso os filtros nos circuitos de leitura de tensão e corrente não sejam iguais. Para compensar as variações dos componentes, foi adicionado um trimpot junto ao comparador, que será explicado mais adiante.

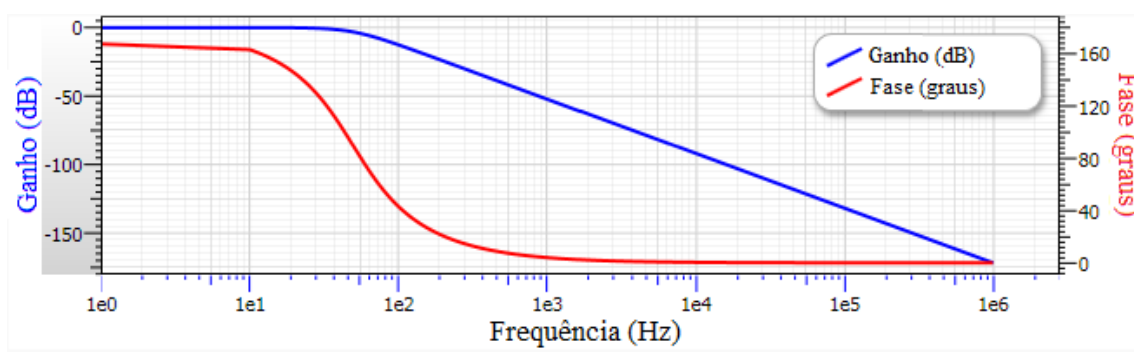


Figura 8 – Diagrama de Bode do filtro utilizado

O atraso de grupo gerado pelo filtro é da ordem de 3ms, o que é um valor bastante baixo não gerando prejuízos significativos ao tempo de resposta final do sistema, que ainda pode agir em um tempo menor que um ciclo de rede a partir da detecção da falta.

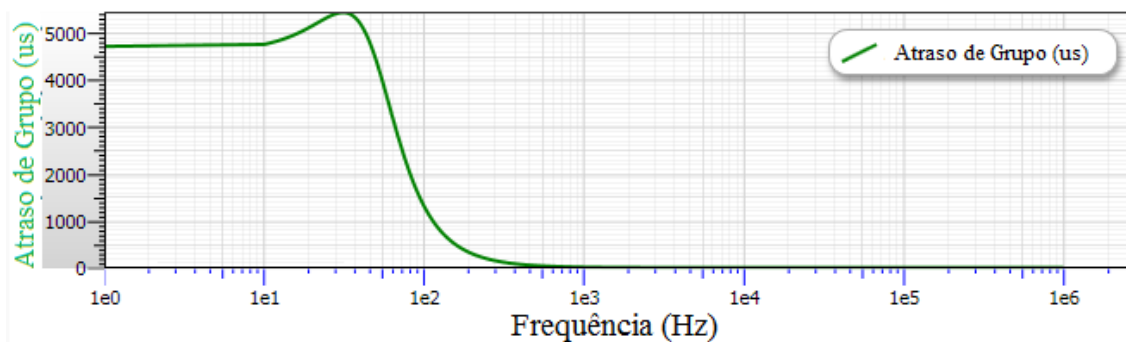


Figura 9 – Atraso de grupo do filtro utilizado

Os ensaios práticos de resposta do filtro encontram-se no capítulo relativo aos ensaios do circuito.

9.4. Comparador de tensão para detecção de zero

O circuito para detecção de zero é um comparador centrado em zero Volts, com a finalidade de dar uma saída em nível alto quando o sinal de entrada estiver acima de zero e um sinal de nível baixo quando o sinal de entrada estiver abaixo de zero, conforme pode ser visto na figura abaixo.

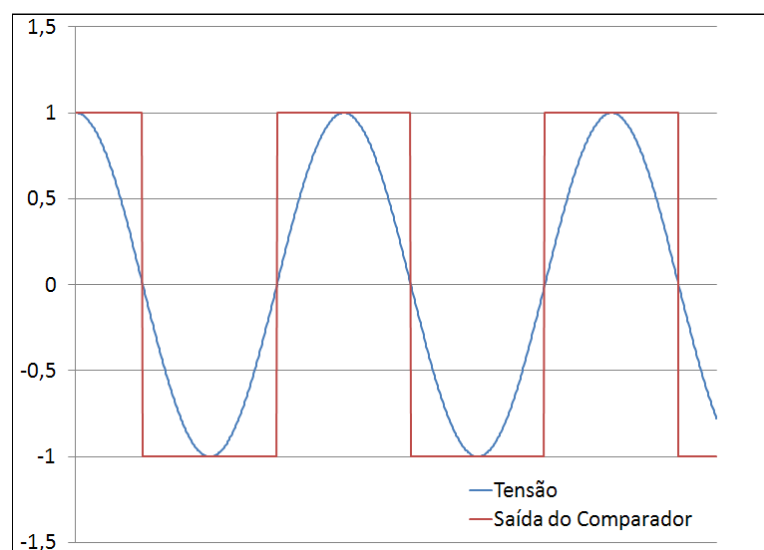


Figura 10 – Forma de onda na saída do comparador

Para que o circuito possa comparar desta forma, o sinal de entrada deve estar sem nenhum DC offset, ou seja, centrado em zero Volts. Para isso é utilizado um capacitor de desacoplamento na entrada do comparador, com um resistor para terra de forma a referenciar o sinal.

Como a resposta do circuito no tempo é importante, novamente deve-se garantir que os circuitos tenham igual defasagem sobre o sinal de saída, para não gerar distorções na medição. Neste caso, em um dos circuitos o resistor para terra foi substituído por um trimpot, que permite alterar a relação entre R e C, e desta forma, calibrar a defasagem para que os circuitos de leitura de tensão e de corrente sejam iguais.

Como o comparador oscila de 12 a -12V, na saída do circuito, como pode ser visto na figura abaixo, foram colocados um diodo em série e um diodo Zener para garantir que a tensão de saída seja de 0 a 5V. Isso é necessário para proteger a entrada do microcontrolador, que pode ser danificada por sinais negativos ou por sinais com amplitude maior que a fonte.

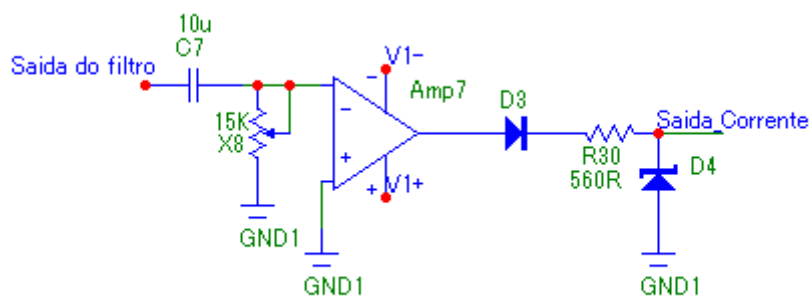


Figura 11 – Circuito de comparação do sinal

Este circuito apresenta algumas desvantagens, como o fato de que ruídos relativamente pequenos na entrada podem gerar saídas espúrias, porém ainda assim é possível obter uma resposta satisfatória tendo em vista que o filtro elimina grande parte dos ruídos na entrada.

10. Processamento dos sinais

10.1. Hardware

Um circuito à parte foi gerado para o processamento dos sinais de saída dos comparadores dos circuitos de aquisição. Nesta placa foram adicionados teclas e *display* LCD para interface com o usuário, bem como uma saída a relé para atuar sobre a contadora, podendo atuar sobre o sistema que está sendo monitorado. Também foram colocadas entradas analógicas para possibilitar a leitura de níveis de tensão, caso necessário.

10.1.1. Escolha do processador

A escolha do processador / microcontrolador é uma etapa importante deste projeto, uma vez que os dados devem ser adquiridos, processados e devem gerar uma saída adequada em tempo real, atuando sobre o sistema o mais rápido quanto possível.

O microcontrolador deve atender os seguintes requisitos mínimos:

- Um timer interno de 16 bits (com interrupção por estouro).
- 14 pinos de *I/O* digital.
- *Clock* de máquina de 4MHz.
- Interrupção externa por borda.
- Memória *Flash* Interna.
- Memória RAM interna.
- 1 Entrada Analógica.

Partindo destas especificações, coloca-se um requisito extra pela disponibilidade de gravador para o microcontrolador escolhido. Neste caso, tem-se apenas gravador disponível para a família de microcontroladores Microchip PIC.

Dentro desta restrição, estas especificações são atendidas por microcontroladores da família PIC16F. Como um dos requisitos é um *clock* de máquina de 4MHz, e os PIC's executam um ciclo de máquina para cada 4 ciclos de *clock*, então tem-se um processador com *clock* mínimo de 16MHz.

Novamente pela disponibilidade de mercado, o processador escolhido é o POC16F87x, especificamente o 16F877/20, que atende e supera as especificações mínimas estabelecidas.

10.2. Software

Para a confecção do *software* foi criado um fluxograma básico, indicando a ordem das operações e ações. O fluxograma encontra-se no Anexo B deste relatório.

Considerando as funcionalidades do relé em desenvolvimento, a principal função do software é contar o tempo entre as bordas de subida/descida do sinal de saída dos comparadores de tensão e de corrente e posterior cálculo do ângulo.

Outra funcionalidade importante é a medição da frequência do sinal, logo a contagem de tempo entre bordas do próprio sinal de tensão também é feita.

10.2.1. Utilização dos *timers*

Para a contagem de tempo foi utilizado o *Timer 1* do microcontrolador, um timer de 16 bits com *prescaler* de até oito vezes e que gera uma interrupção a cada *overflow*.

O *prescaler* é um divisor de *clock* na entrada do *timer*, e como o *timer* é um contador dos ciclos de máquina, pode-se facilmente estabelecer qual o tempo que leva até o *overflow* do *timer* e a geração de uma interrupção.

Considerando que o valor máximo de um registrador de 16 bits é $2^{16} = 65536$ valores, e que o *clock* de máquina do microprocessador é $20\text{MHz}/4 = 5\text{MHz}$, temos

$$T_{t1} = \frac{1}{5 \cdot 10^6} * 2^{16} P_s \quad (10.1)$$

Sendo P_s o valor do *Prescaler* que pode ser de 1, 2, 4 ou 8 vezes. Com $P_s = 2$ obtém-se

$$T_{t1} = 0,2\mu s * 65536 * 2 = 0,0262144s \cong 26,2ms \quad (10.2)$$

Sendo o período de um ciclo de rede 16,66ms, pode-se concluir que o *timer* não irá gerar interrupções em operação normal, pois, como pode ser visto no fluxograma, a cada ciclo de rede o *timer* é zerado para iniciar uma nova contagem. O tempo de *overflow* do *timer* é então utilizado para a detecção de falta de fase. Caso mais de um

overflow do *timer* aconteça em sequência o *software* irá entender que não está sendo recebido sinal de tensão, acusando falta.

O *timer 2* também é utilizado, sendo o responsável pelo controle da taxa de atualização da tela e taxa de leitura de teclas. A cada *overflow* deste *timer*, calculado da mesma forma que o *timer 1*, um contador é incrementado. Através do número de incrementos do contador de *overflow* é possível controlar a atualização e leitura das interfaces.

10.2.2. Interrupções por borda

Para uma contagem de tempo mais precisa foi utilizada a função de interrupção por borda em uma das portas do microcontrolador. Esta funcionalidade gera uma interrupção sempre que há alteração de nível lógico em algum dos pinos do *portb* do PIC.

A interrupção, quando gerada, imediatamente desvia o curso normal do programa para outro ponto da memória onde o *software* verifica qual porta que sofreu alteração no seu nível lógico. Desta forma, torna-se possível adquirir o valor de tempo e imediatamente reiniciar a contagem quando houver uma borda de subida ou de descida nas saídas dos comparadores, minimizando os erros nas medições de frequência e ângulo.

Neste caso específico, como pode ser visto no fluxograma anexo ao corpo deste relatório, a caso a interrupção seja gerada por uma borda do sinal de tensão, o valor do *timer* é adquirido, o *timer* é reiniciado e a *flag* que inicia o cálculo de frequência é habilitada. Se a interrupção foi gerada por uma borda do sinal da corrente, o programa adquire o valor do *timer* sem reiniciar o mesmo e habilita a rotina de cálculo de ângulo.

Com os testes do *software* foram encontrados problemas de ordem prática nesta rotina. Quando a defasagem entre corrente e tensão é muito próxima de zero, as bordas na porta do microcontrolador podem acontecer com uma diferença de tempo da ordem de microssegundos. Isso faz com que a interrupção seja gerada para atender a primeira borda e não registre a segunda. Para solucionar este problema ao fim da rotina os valores presentes no *portb* são comparados aos valores que estavam presentes no mesmo no início da rotina. Caso estes valores sejam diferentes entre si, pode-se concluir

que uma borda de corrente ou de tensão ocorreu durante a rotina de interrupção, então esta deve ser atendida através de uma repetição da rotina de interrupção.

10.2.3. Cálculo de ângulo e frequência

O cálculo de frequência é feito em três etapas bastante simples:

Se o *flag* de cálculo de frequência estiver habilitado, o valor adquirido pelo *timer*, que é o número de ciclos de máquina que transcorreram desde que este foi zerado na última borda, é transformado em tempo com a equação abaixo.

$$T_{ciclo} = Timer1 * \frac{1}{\frac{20MHz}{4}} * Prescaler \quad (10.3)$$

Como a frequência dos ciclos de máquina é constante (5MHz) e o *prescaler* tem valor fixado em 2 na inicialização do software, os dois últimos termos formam uma constante. Logo,

$$T_{ciclo} = Timer1 * \frac{2}{5000000} = Timer1 * 0,0000004 \quad (10.4)$$

Feita esta multiplicação, agora é necessário que o tempo seja convertido em frequência.

$$Freq = \frac{1}{T_{ciclo}} \quad (10.5)$$

A terceira etapa é necessária pelo fato de que valores adquiridos em circuitos digitais podem sofrer com variações espúrias, portanto é necessário fazer a média dos últimos valores adquiridos para obter um valor válido e estável. Para isso é feita uma média móvel dos últimos vinte valores medidos.

A média móvel é uma média que sempre descarta o valor mais antigo e insere um valor novo em um vetor contendo as últimas amostras. Para isso, tem-se um vetor de vinte posições que é rotacionado para a esquerda de forma a descartar o valor mais antigo e abrir espaço para o valor mais recente. Depois de atualizado o vetor, todos os valores são somados e a soma é dividida pelo número de posições, que neste caso é de vinte valores.

A medição de ângulo é muito similar à de frequência. Depois de adquirido o valor do *timer*, este é convertido em tempo da mesma forma que no caso anterior. Para

calcular o ângulo é feita uma regra de três simples entre o valor de tempo de um grau elétrico e o valor de tempo adquirido. Para maior precisão, o valor de tempo referente a um grau elétrico é calculado a partir do tempo do ultimo ciclo de rede medido.

$$T_{1grau} = \frac{T_{ciclo}}{360} \quad (10.6)$$

E então o ângulo é calculado:

$$Defasagem = \frac{T_{defasagem}}{T_{ciclo}} \quad (10.7)$$

Assim como na medição de frequência, os ângulos medidos são inseridos em um vetor para possibilitar o cálculo de média móvel.

10.2.4. Atuação em caso de anormalidade

Como o sistema desenvolvido tem como finalidade proteger dispositivos de potência em situações de comportamento anormal, é fundamental que o software tenha um algoritmo para identificação e atuação nestas situações.

Para identificar potência reversa, o software utiliza a média obtida a partir do vetor de dados com os últimos vinte valores de ângulo calculados. A partir destes a dos é feita uma comparação com ângulos fixos, já que a potência reversa, como explicado anteriormente, se dá quando a componente ativa da potência torna-se positiva. Neste caso, o ângulo entre os fasores de tensão e corrente estará compreendido entre $-90^\circ > \theta > -270^\circ$.

Por razões de estabilidade, o *software* considera a potência reversa entre $-85^\circ > \theta > -275^\circ$ graus, já que oscilações ou até erros de medição podem gerar situações onde a defasagem pode atingir ângulos fora do segundo e do terceiro quadrantes.

No caso de sub/sobre frequência, o Módulo 8 do Prodist estabelece as seguintes limitações quando de distúrbios no sistema de distribuição:

- Instalações de geração dever retornar à faixa entre 59,5Hz e 60,5Hz em no máximo 30 segundos quando sair desta faixa.

Havendo necessidade de corte de cargas para o restabelecimento do equilíbrio carga-geração, os seguintes limites são estabelecidos:

- A frequência, em casos extremos, não pode ultrapassar os seguintes limites:
 $56,5\text{Hz} < f < 66\text{Hz}$.
- Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos.
- Pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

Como o sistema desenvolvido não tem como foco principal a proteção de frequência (função 81) foram inseridos limites estáticos de 56,5 e 66Hz, que causam a desconexão imediata da central de geração.

11. Protótipo

O protótipo foi construído com base nos cálculos, dimensionamentos e especificações explicitados anteriormente neste relatório. Para possibilitar a montagem, todos os circuitos anteriormente projetados e simulados foram desenhados em um software CAD para possibilitar o projeto das placas de circuito impresso. O circuito foi dividido em etapas, e cada uma destas etapas foi montada em uma placa separada, tanto para facilitar a prototipagem como para garantir que, caso alguma das etapas viesse a apresentar problemas, poderia ser facilmente corrigida e substituída sem afetar as demais partes do circuito.

Como pode ser visto no Anexo A, os circuitos de medição e desacoplamento necessitam de duas fontes cada, uma vez que a referência antes do opto-acoplamento deve ser diferente da referência depois do mesmo. É importante salientar também que para manter maior liberdade de medição, permitindo que tensões e correntes sejam medidas em pontos separados do sistema, as referências destas medições também são isoladas entre si, evitando o risco de curto-circuito através dos circuitos de medição. A divisão dos circuitos e suas fontes podem ser vistas abaixo.

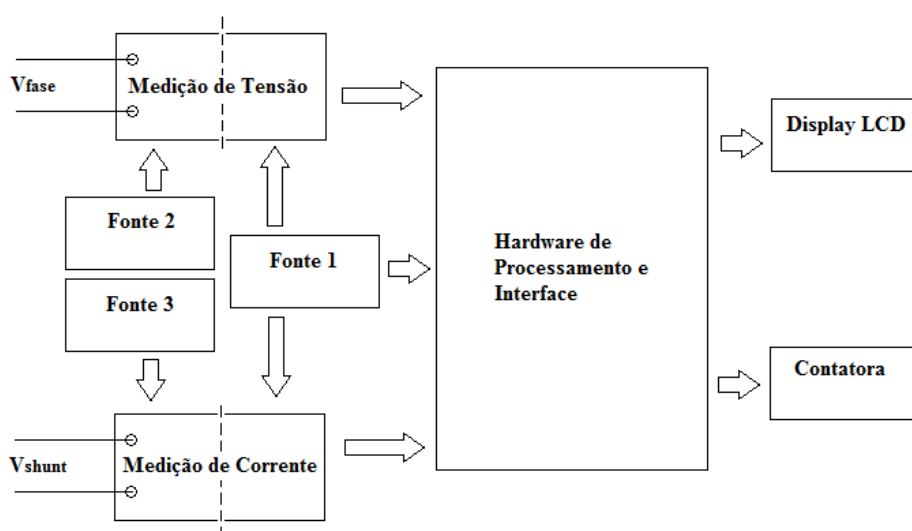


Figura 12 – Diagrama de montagem do protótipo

Partindo-se deste diagrama as placas que podem ser vistas na figura 13 foram confeccionadas, montadas sobre uma plataforma e interligadas. Por razões de

segurança, cada um dos terminais de leitura de sinal foi interligado ao circuito através de um fusível, uma vez que um curto-circuito dentro de uma das placas sem as devidas proteções pode ser bastante destrutivo.

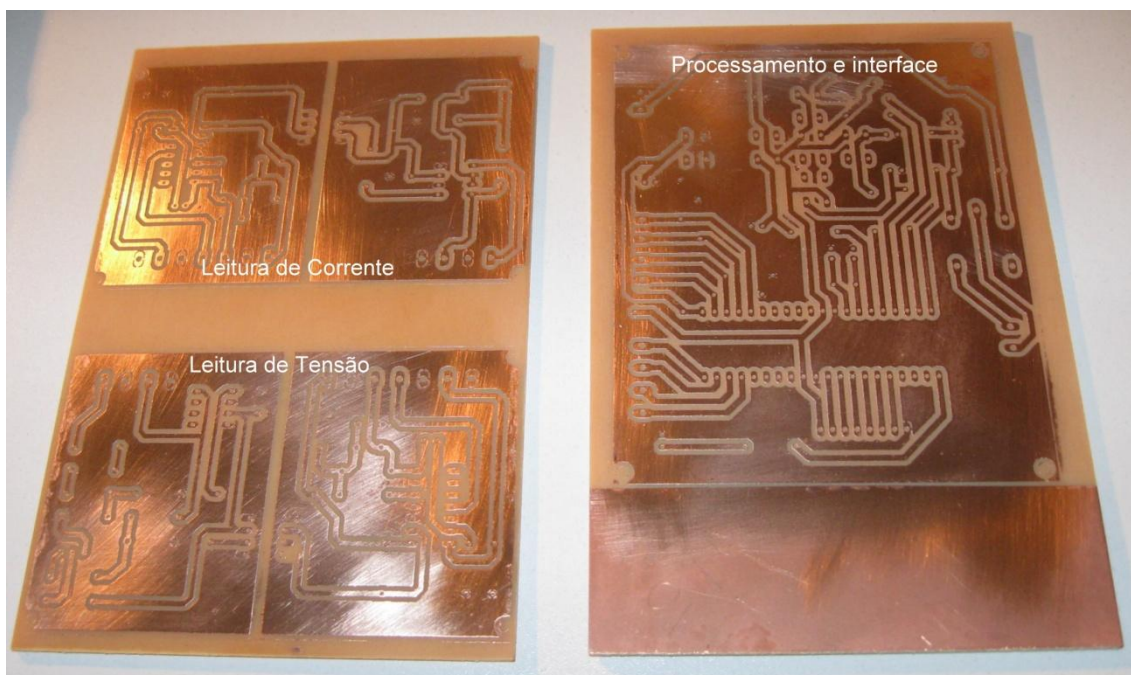


Figura 13 - Placas confeccionadas para o protótipo

A figura abaixo apresenta a montagem final do protótipo e nomeia cada uma das etapas do circuito, conforme indicadas na figura 12. A interligação entre as placas foi feita com condutores com capacidade de isolamento de 750V, devido aos níveis de tensão envolvidos nas medições.

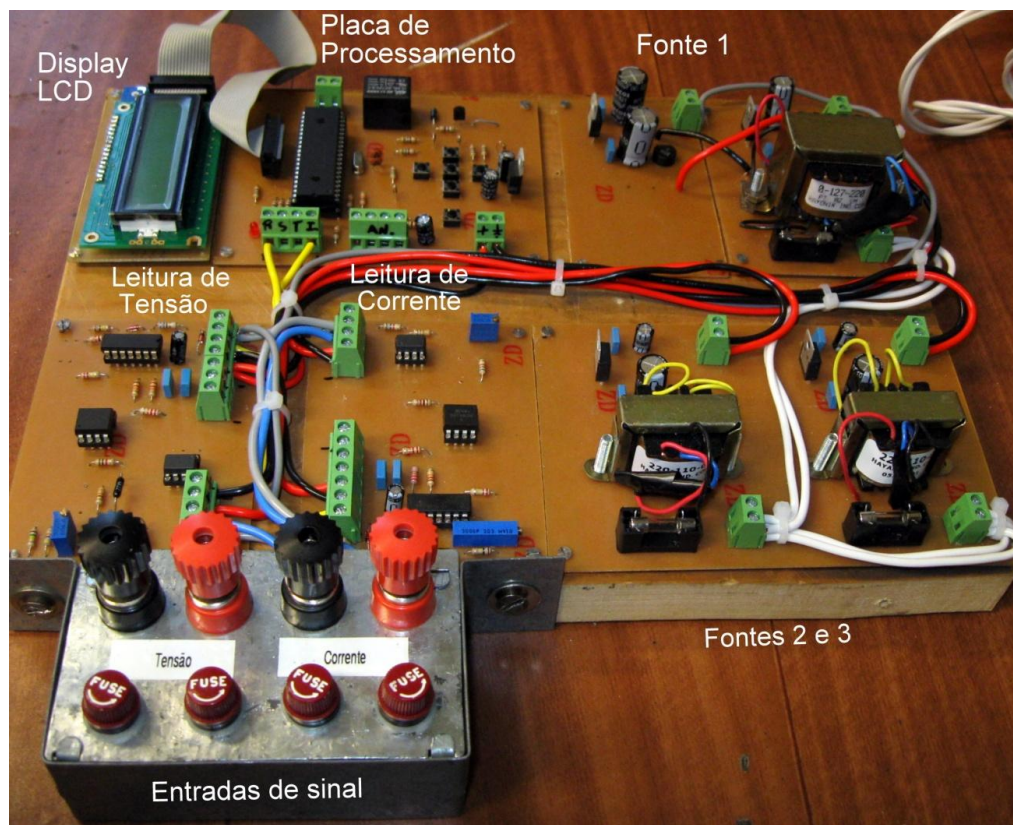


Figura 14 - Protótipo montado

Depois de finalizado o protótipo, testes de níveis de tensão e de continuidade entre pontos críticos das placas foram feitos para minimizar a chance de ocorrência um problema devido a erros de montagem.

12. Ensaios Realizados

Foram realizados ensaios com o protótipo já finalizado para, em um primeiro momento, testar o funcionamento do mesmo e, posteriormente, aferir os valores medidos comparando os mesmos com instrumentos de referência disponíveis no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia.

12.1. Ensaios iniciais

12.1.1. Testes com cargas variadas

Para verificação do correto funcionamento do protótipo, foram utilizadas cargas capacitivas, indutivas e resistivas presentes nos quadros de carga da sala 110 do LMEAE. Essas cargas possuem, em módulo, impedâncias muito semelhantes quando ligadas em 60Hz, o que possibilita que os ângulos entre tensão e corrente previamente determinados para o teste sejam facilmente aplicados na entrada do circuito. Durante os testes foram encontrados problemas, como níveis de *offset* desajustados e saturação na leitura de corrente devido ao valor muito alto do resistor *shunt* utilizado na ocasião. Corrigidos estes problemas, os testes foram refeitos e o circuito comportou-se como esperado, indicando defasagens de aproximadamente -90° para os indutores, aproximadamente $+90^\circ$ para os capacitores e defasagem zero para cargas resistivas.

12.1.2. Teste de resposta do filtro

Como as cargas utilizadas no ensaio anterior não apresentaram distorções harmônicas de corrente, uma carga não linear com distorções harmônicas por saturação do núcleo ferromagnético foi ligada ao circuito para a verificação do funcionamento do filtro. Foram feitas medidas a partir do osciloscópio para determinar se o conteúdo harmônico sofreu redução entre a entrada e a saída do filtro. O filtro apresentou atenuações no conteúdo harmônico, porém não foram feitos testes qualitativos.

Mais testes com o filtro são necessários para obter o diagrama de bode do mesmo, o que possibilitaria a comparação entre os valores simulados e os valores reais de resposta do mesmo. Porém, estas medições não foram efetuadas, sendo priorizados

outros ensaios mais importantes para a comprovação do funcionamento do sistema desenvolvido.

12.2. Medição de frequência

Foram feitos ensaios para avaliar o erro da medição de frequência do sistema desenvolvido. Para a realização destes ensaios foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Fonte HP 6834B
- Multímetro Agilent 34401A

A fonte HP é uma fonte trifásica de alta potência onde o usuário pode alterar a forma de onda da e a frequência do sinal gerado. Neste caso, foi utilizada uma saída senoidal frequências variando entre 55 e 65Hz.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de frequência

Medição de frequência Fonte HP				
	Fonte HP (Hz)	Multímetro Agilent (Hz)	Relé Desenvolvido	Erro %
Min	55,00	54,99	54,98	0,02
Máx	55,00	55,00	55,03	0,05
Min	56,00	55,99	55,99	0,00
Máx	56,00	56,00	56,02	0,04
Min	57,00	56,99	57,00	0,02
Máx	57,00	57,00	57,01	0,02
Min	58,00	57,99	57,98	0,02
Máx	58,00	58,00	57,99	0,02
Min	59,00	58,99	58,99	0,00
Máx	59,00	59,00	59,02	0,03
Min	60,00	59,99	60,00	0,02
Máx	60,00	60,00	60,01	0,02
Min	61,00	60,99	60,98	0,02
Máx	61,00	61,00	61,02	0,03
Min	62,00	61,99	61,98	0,02
Máx	62,00	62,00	62,03	0,05
Min	63,00	62,99	63,00	0,02
Máx	63,00	63,00	63,02	0,03
Min	64,00	63,99	63,92	0,11
Máx	64,00	64,00	64,05	0,08
Min	65,00	64,99	64,99	0,00
Máx	65,00	65,00	65,02	0,03

Para fazer a leitura da frequência do sinal de saída foi utilizado o multímetro Agilent 34401A, que é um equipamento com 6 ½ dígitos de precisão e capacidade para leitura de frequência.

O teste foi realizado tendo a fonte como gerador de sinal senoidal com baixo THD e com frequência variável e o multímetro foi utilizado como valor de referência na leitura da frequência. Foram registrados os valores mínimos e máximos indicados por cada instrumento para cada uma das frequências de saída da fonte. Os resultados seguem na tabela 1:

A partir dos dados obtidos foi possível calcular o erro encontrado em cada medida com relação ao valor de referência na saída do multímetro. O erro encontrado foi menor ou igual a 0,11% em todas as aquisições.

Essa precisão indica que o dispositivo criado ao longo deste trabalho oferece medições consistentes de frequência podendo ser posteriormente utilizado como base para um relé de proteção contra sub/sobre frequência.

12.3.Deteccão de potência reversa

Para o ensaio de detecção de potência reversa, o dispositivo foi ligado à Pequena Central Elétrica (PCE) presente nas instalações do LMEAE. A PCE é uma planta que simula uma Central de Geração Hidráulica (CGH), utilizando para isso uma caixa d'água como reservatório e uma bomba de água controlada por um inversor de frequência para simular a queda d'água. Obviamente, não é esperado que a potência gerada pelo sistema seja maior que a potência consumida pela bomba d'água, mas a turbina e o gerador, quando conectados à rede, comportam-se como uma micro-usina entregando potência localmente, com a vantagem de que a vazão de água pode ser regulada através da frequência do inversor.

Como este teste foi o primeiro realizado com o dispositivo criado neste trabalho ligado a circuito trifásico, um estudo das ligações possíveis e da implicação destas na medição de ângulos deve ser considerado.

12.3.1. Análise das formas de ligação

Basicamente existem quatro formas de ligação do relé desenvolvido para a leitura de tensão e corrente em um circuito trifásico:

- Tensão de linha e corrente de linha.
- Tensão de fase e corrente de fase.
- Tensão de linha e corrente de fase.
- Tensão de fase e corrente de linha.

12.3.1.1. Análise da ligação com tensão de linha e corrente de fase

A tensão de linha é normalmente utilizada devido à facilidade de acesso à mesma, sendo que em alguns casos, dependendo da forma de ligação do gerador, não se tem acesso ao neutro.

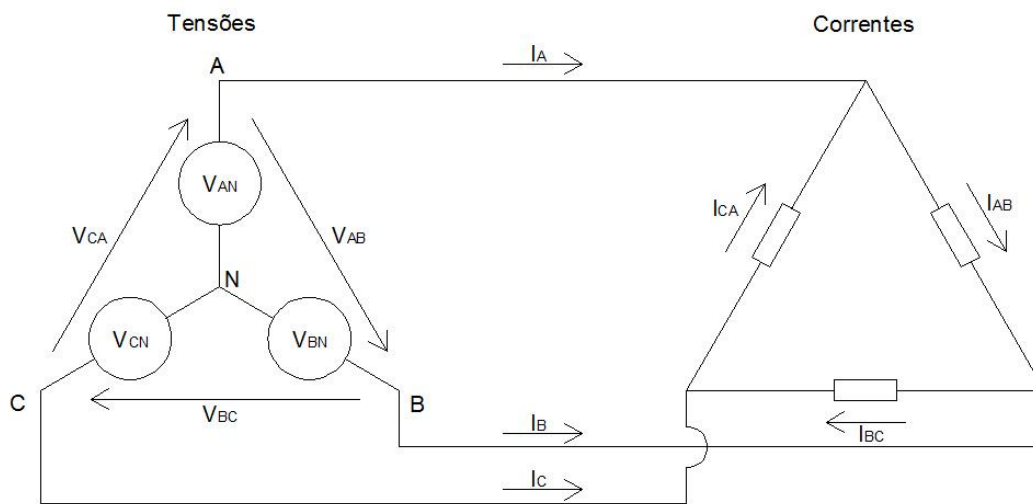


Figura 15 – Diagrama de tensões e correntes trifásicas em delta

Na figura 15 tem-se um diagrama com indicando as tensões e correntes envolvidas em uma ligação em delta. Partindo desta nomenclatura e dos ângulos aparentes no diagrama, define-se:

$$\begin{cases} V_{AN} = |V_{AN}| \angle 0^\circ \\ V_{BN} = |V_{BN}| \angle -120^\circ \\ V_{CN} = |V_{CN}| \angle 120^\circ \end{cases} \quad (12.1)$$

Com estas tensões de fase, obtêm-se as seguintes tensões de linha:

$$\begin{cases} V_{AB} = |V_{AB}| \angle 30^\circ \\ V_{BC} = |V_{BC}| \angle -90^\circ \\ V_{CA} = |V_{CA}| \angle 150^\circ \end{cases} \quad (12.2)$$

Considerando-se uma carga em delta com ângulo entre tensão e corrente igual a ϕ as correntes de fase serão as seguintes:

$$\begin{cases} I_{AB} = |I_{AB}| \angle 30^\circ + \phi \\ I_{BC} = |I_{BC}| \angle -90^\circ + \phi \\ I_{CA} = |I_{CA}| \angle 150^\circ + \phi \end{cases} \quad (12.3)$$

Nota-se que a corrente de fase e a tensão de linha estão em fase, logo o relé deve atuar entre $-90^\circ > \theta > -270^\circ$. Porém, este caso tem pouca utilidade prática, uma vez que para obter a corrente de fase deve-se inserir o resistor shunt ou o TC dentro da ligação delta, o que em alguns casos pode ser difícil ou até impossível de ser feito.

12.3.1.2. Análise da ligação com tensão de fase e corrente de linha

A tensão de fase é definida na equação 12.1. A corrente de linha é definida como segue:

$$\begin{cases} I_A = |I_{AB}| \angle 30^\circ + \phi - |I_{CA}| \angle 150^\circ + \phi \\ I_B = |I_{BC}| \angle -90^\circ + \phi - |I_{AB}| \angle 30^\circ + \phi \\ I_C = |I_{CA}| \angle 150^\circ + \phi - |I_{BC}| \angle -90^\circ + \phi \end{cases} \quad (12.4)$$

Calculando apenas para I_A :

$$I_A = |I_A| [1 \angle 30^\circ + \phi - 1 \angle 150^\circ + \phi] \quad (12.5)$$

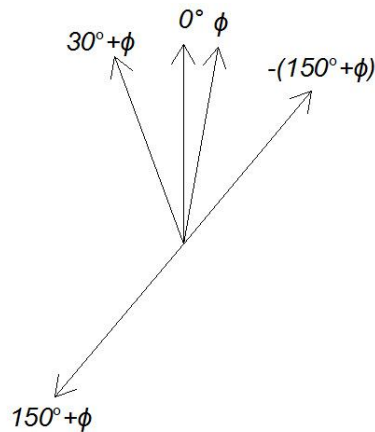


Figura 16 - Diagrama fasorial da corrente de fase

Logo, como pode ser visto no diagrama fasorial da figura 16, o ângulo resultante da corrente de linha é ϕ , então a corrente de linha I_L é dada por:

$$I_L = \sqrt{3} |I_F| \angle \phi \quad (12.6)$$

Sendo I_F a corrente de fase.

Portanto, conclui-se a corrente de linha e a tensão de fase não sofrem adição de nenhuma defasagem, portanto neste caso o relé também deve atuar entre $-90^\circ > \theta > -270^\circ$. Porém, a aplicação deste tipo de ligação também sofre limitações devido à não disponibilidade de neutro em algumas instalações, podendo gerar dificuldades para a ligação do dispositivo.

Para os dois casos anteriores foi provado que não há defasagem adicional entre tensão e corrente devido à ligação, sendo o ângulo medido igual ao ângulo entre tensão e corrente no circuito.

12.3.1.3. Análise para ligação de tensão e corrente de fase

A partir do conjunto de equações 12.3 pode-se afirmar que:

$$I_F = \frac{|I_L|}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ + \phi \quad (12.7)$$

Sendo assim, como a tensão de fase é a referência de zero graus do sistema, é possível afirmar que a corrente de fase é adiantada em trinta graus em relação à tensão de fase, sendo necessário que o relé atue entre $-60^\circ > \theta > -240^\circ$. Essa defasagem é pode ser vista através do diagrama apresentado na figura 15. Neste caso, assim como anteriormente, a corrente de fase pode ser um problema, nem sempre sendo possível adquirir a mesma.

12.3.1.4. Análise para ligação tensão e corrente de linha

As tensões de linha são dadas pela equação 12.3, podendo-se concluir que:

$$V_L = \sqrt{3}|V_F| \angle 30^\circ \quad (12.8)$$

A partir das equações 12.6 e 12.8 é possível perceber que a corrente de linha é atrasada em trinta graus em relação à tensão quando utilizada este tipo de ligação, sendo necessária a atuação do relé entre $-120^\circ > \theta > -300^\circ$.

Apesar desta defasagem adicionada, este tipo de ligação é a mais comumente utilizada pelo fácil acesso às tensões e correntes de linha.

Sendo assim, as duas formas de ligação mais prováveis são as que utilizam a corrente de linha. A defasagem inserida pela diferença entre tensão e corrente de linha pode ser facilmente compensada por software apenas pela subtração de 30 graus do valor de ângulo adquirido, podendo o usuário através de uma tecla definir se a tensão utilizada na aquisição é a tensão de fase ou a tensão de linha, já que a corrente é determinada como sendo sempre a corrente de linha.

É interessante manter disponível ao usuário a situação em que nenhuma defasagem é adicionada pela ligação, pois essa facilita a calibração do sistema, possibilitando o uso de um circuito monofásico para esta finalidade.

12.3.2. Ligação do dispositivo à PCE

O relé direcional de potência criado foi ligado à PCE utilizando a tensão de fase e a corrente de linha. Como explicitado acima, esse tipo de ligação não insere nenhum tipo de defasagem nas medidas efetuadas.

Como a direção da potência é igual nas três fases, não sendo possível obter potência em um sentido em uma fase e em outro sentido nas demais, o relé direcional de potência pode ser ligado em apenas uma fase.

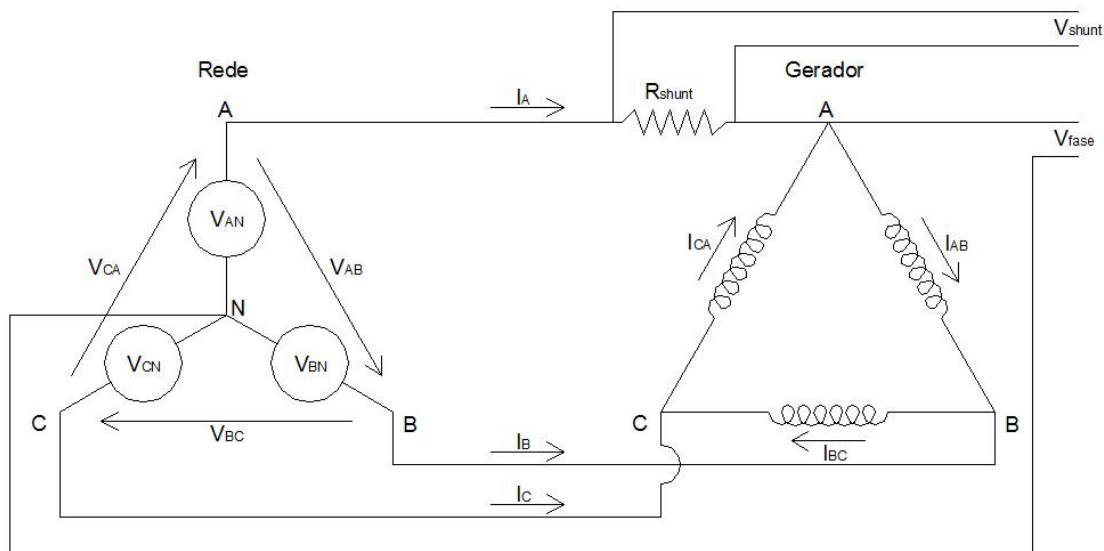


Figura 17 - Diagrama de ligação do relé direcional

Os valores adquiridos estão representados por V_{shunt} e V_{fase} , sendo estes sinais ligados às entradas de tensão e corrente do relé direcional desenvolvido.

12.3.3. Ensaios Realizados

Com as ligações já realizadas, foi necessária a utilização de um instrumento de referência para a comparação dos valores adquiridos. O instrumento utilizado foi o Analisador de Potência 434 da Fluke, que tem capacidade de adquirir as tensões, correntes e ângulos para plotar na tela um diagrama fasorial trifásico. O instrumento foi ligado como indicado na figura 18.

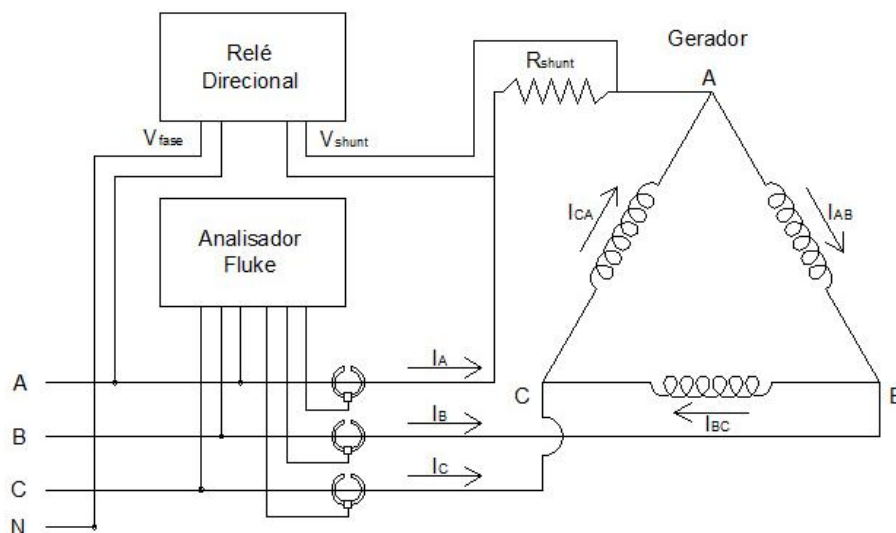


Figura 18 - Esquema de ligação para o ensaio

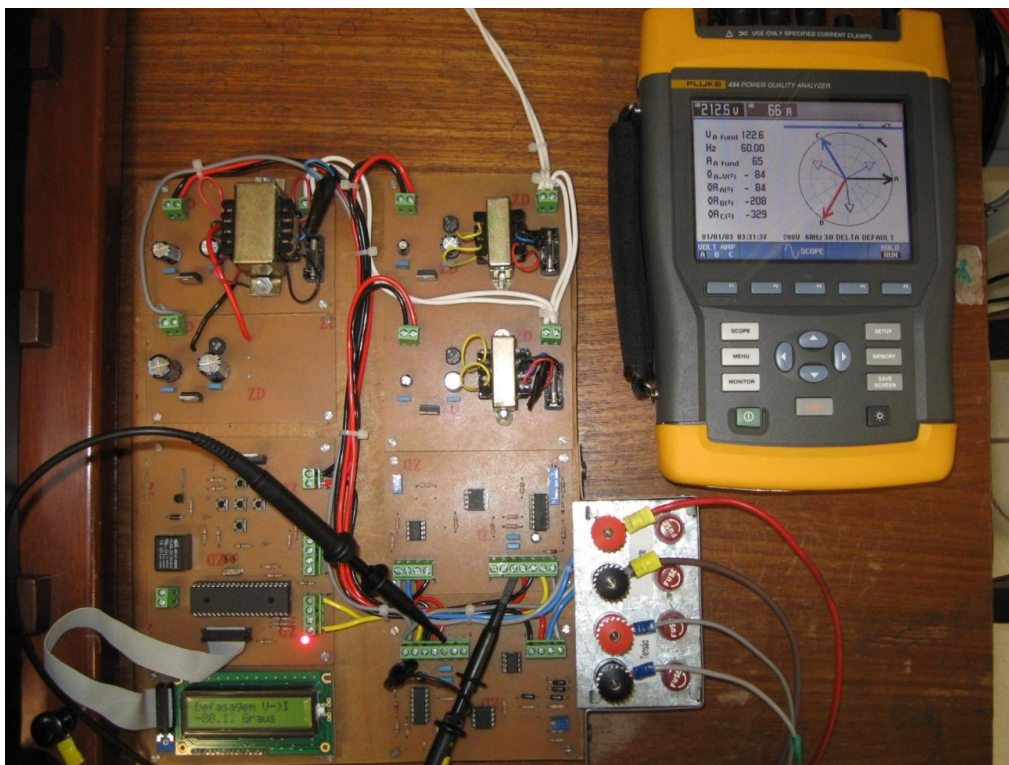


Figura 19 - Ensaios PCE com analisador Fluke

Como referência também foram utilizados os medidores de potência ativa, reativa e velocidade angular presentes no painel de instrumentos da usina.

O analisador Fluke utilizado pode ser visto na figura 19. Todas as aquisições feitas nesta batelada de dados foram registrados em imagem, incluindo os valores indicados no painel da usina e os sinais na tela do osciloscópio.

Os resultados obtidos neste ensaio encontram-se na tabela 2. Os erros apresentados pelo dispositivo criado apresentaram um valor máximo de 7% dentro da faixa de interesse.

Apesar de este erro ser relativamente grande, é necessário ressaltar que apenas em ocasiões muito específicas a potência gerada por uma micro usina se aproximará de zero com esta em funcionamento normal, sendo que em caso de falha na máquina primária a potência sairá de valores próximos ao nominal como gerador para absorver uma potência relativamente alta da rede, transitando assim de ângulos de defasagem próximos a -180 graus para ângulos próximos a zero em poucos ciclos de rede.

Nestes casos, o relé direcional de potência criado irá operar normalmente, protegendo a usina da motorização indesejada.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de leitura direção da potência

Ensaio relé de Potência Reversa						
Analisador Fluke		Relé Direcional		Painel Usina		Erro ângulo
Ângulo (Graus)	Freq (Hz)	Ângulo (Graus)	Freq (Hz)	P Ativa	P Reativa	
-80	59,99	-76,20	59,99	0,3kW (M)	2,4kW	5%
-82	60,02	-78,80	60,04	0,2kW(M)	2,3kW	4%
-84	60,01	-80,20	60,02	0,2kW(M)	2,3kW	5%
-86	60,00	-82,10	60,02	0,1kW(M)	2,4kW	5%
-88	59,99	-84,10	60,02	0kW	2,4kW	4%
-90	59,98	-85,20	60,00	0kW	2,4kW	5%
-92	60,00	-87,10	60,01	0,1kW(G)	2,4kW	5%
-94	60,01	-89,00	59,99	0,2kW(G)	2,4kW	5%
-96	60,00	-90,10	60,00	0,3kW(G)	2,5kW	6%
-98	60,02	-91,11	60,02	0,3kW(G)	2,5kW	7%
-100	60,03	-92,80	60,04	0,5kW(G)	2,4kW	7%

13. Conclusões

A partir dos resultados apresentados nos ensaios anteriores, é possível afirmar que o sistema funciona de forma satisfatória, apesar dos erros de medição de ângulo encontrados. Mesmo assim, ajustes e melhorias são necessários, tais como um filtro de maior ordem, para reduzir ainda mais a influência do conteúdo harmônico, referências internas e fontes para o circuito mais estáveis e blindagem para reduzir a interferência de ruído eletromagnético.

O dispositivo criado atende ao principal requisito estabelecido, porém os demais foram apenas parcialmente atendidos. Ajuste de tempo de retardo, por exemplo, pode ser implementado via *software* facilmente, porém a leitura da corrente mínima para disparo depende da criação de um *hardware* específico para o condicionamento da corrente antes de entregar este valor na entrada analógica do microcontrolador. As tensões de entrada não foram totalmente testadas, pois ensaios com 380V na entrada de tensão não foram realizados.

Apesar das limitações apresentadas, o hardware base do sistema é bastante útil, podendo os módulos criados para a leitura de corrente e tensão serem utilizados para condicionamento e desacoplamento de sinais de potência para módulos de aquisição de baixa tensão, como os NI-DAQ por exemplo.

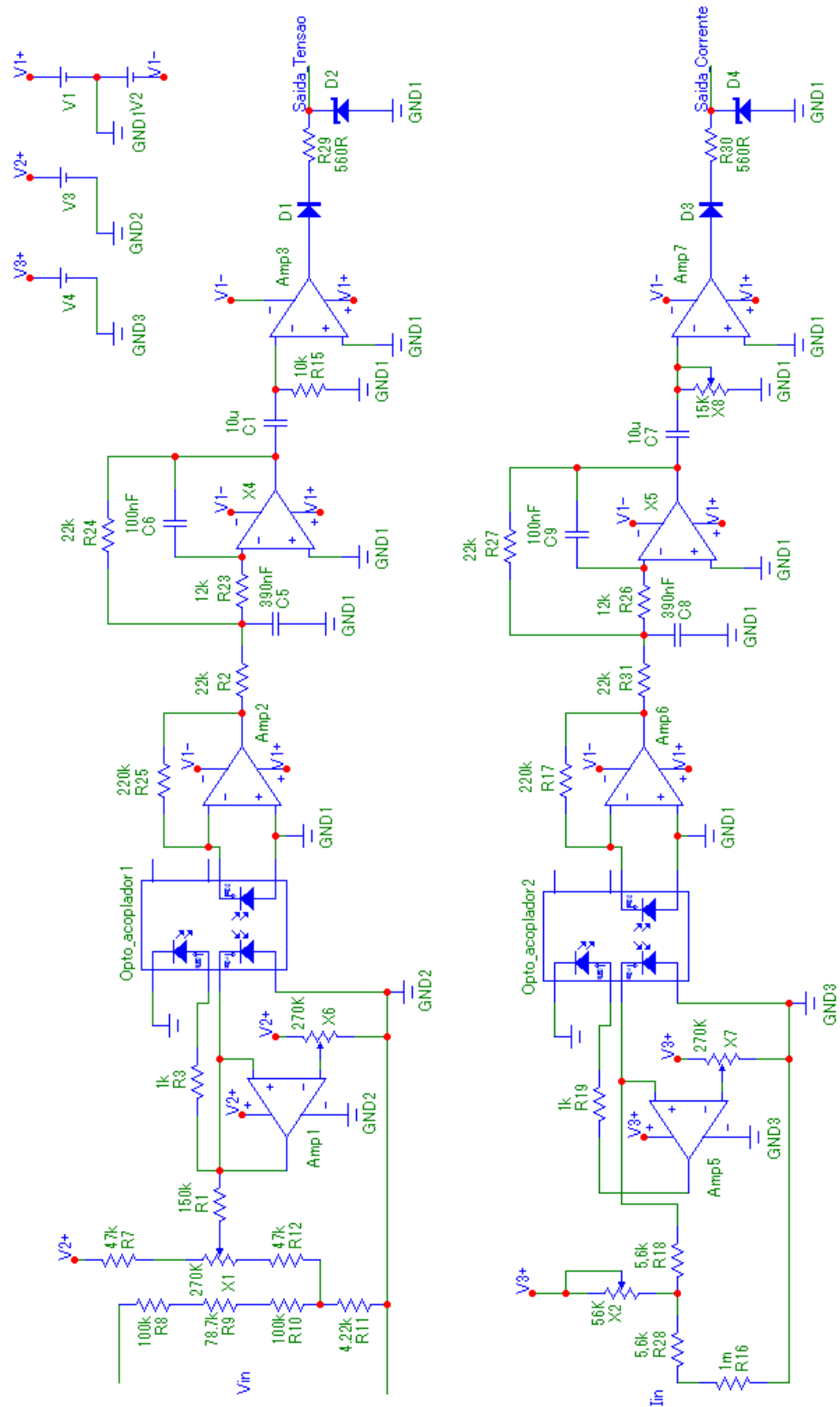
Do ponto de vista da aprendizagem este trabalho foi muito interessante, pois demandou conhecimentos da área de eletrônica analógica e digital, microcontroladores, elétrica de potência entre outras, apresentando-se como uma sólida experiência consolidação dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de engenharia elétrica.

14. Bibliografia

1. **Lora, Electo Eduardo Silva e Haddad, Jamil.** *Geração Distribuída - Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais*. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
2. *Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras.* **Marcos Vinícius Xavier Dias, MSc., Edson da Costa Borotni, D.Sc. e Jamil Haddad, D.Sc.** 2, Rio de Janeiro : Revista Brasileira de Energia, Vol. 11.
3. **Empresa de Pesquisa Energética – EPE.** PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2009-2018. Rio do Janeiro : s.n., 2009.
4. **Oliveira, Adriano Santhiago.** Modalidades e procedimentos simplificados do mecanismo de desenvolvimento limpo e a eletrificação residencial rural baseada em projetos de geração de energia renovável em pequena escala.
5. **SCHELEDER, E. M. M.** O Mercado Invisível. Brasília : s.n., 1998.
6. **ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica.** *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*. Resolução Normativa nº 395 : ANEEL, 2009.
7. **IEEE Std 1547.1.** *IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. Nova York, EUA : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005.
8. **IEEE C37.2 .** Standard for Electrical Power System Device Function Number. Nova York, EUA : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2008.
9. **IEEE C37.90.** Relay System Associated With Eletric Power Apparatus. Nova York, EUA : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005.
10. **Nichols, William H. e Castro, Cristobal A.** Power System Phase Rotation and Polarized Protective Relays. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 1990, Vol. 26, 6.
11. **TAYLOR, G. E.** Reverse-Power Alternating-Current Relays For 3-Phase. s.l. : IEEE, 1928.

Anexos

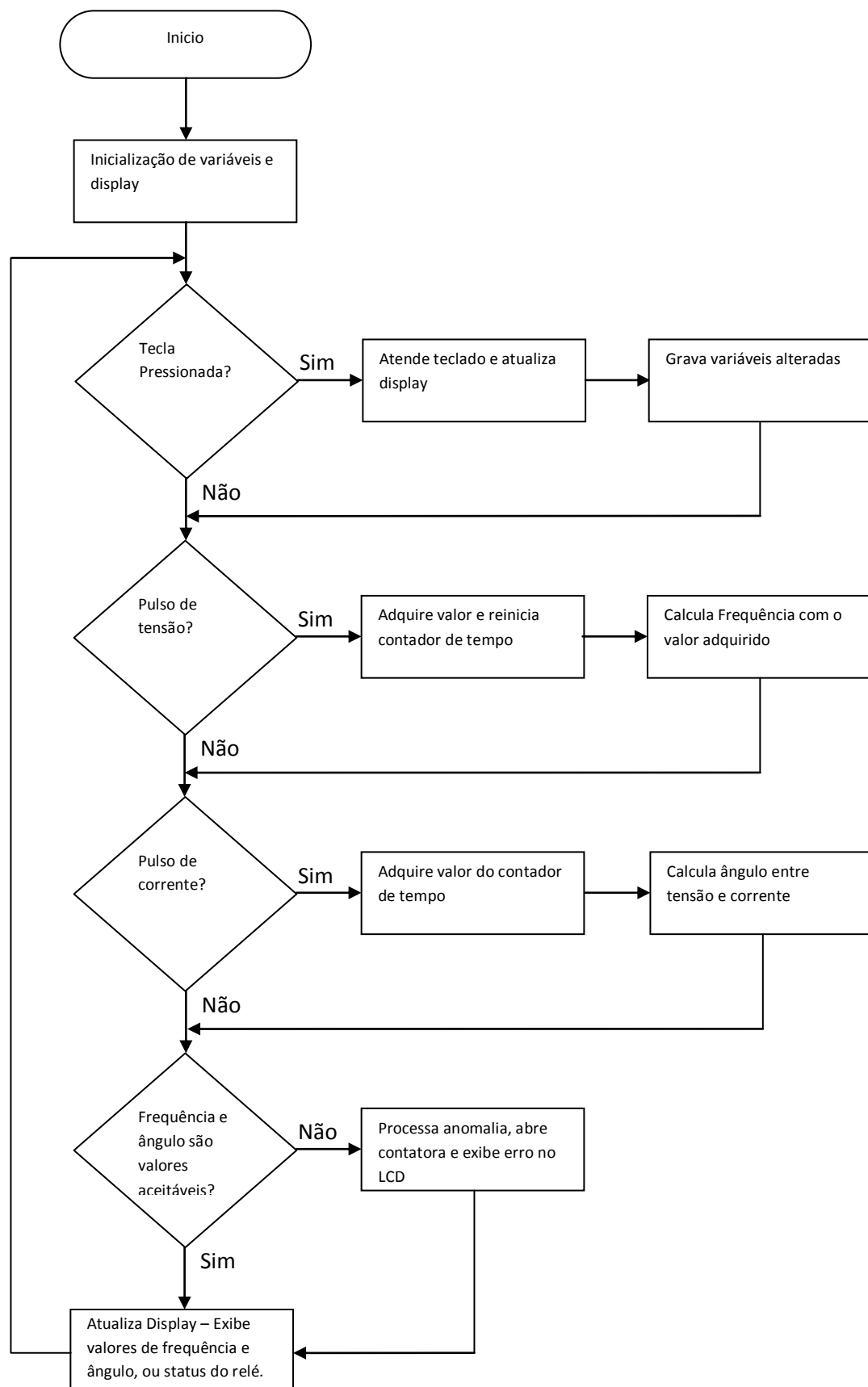
Anexo A – Diagrama do Circuito em MicroCap



Esquemático em do circuito de aquisição em MicroCap

Anexo B – Fluxograma básico do software

Diagrama da Rotina Principal de Software do Relé de Potência



Anexo C – Código fonte do software

```

/*=====
SOFTWARE RELÉ DE POTÊNCIA REVERSA

TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO - ENGENHARIA ELÉTRICA

Autor:
Henrique Luís Sauer Oliveira
=====

*/#define Versao 8

/*      Controle de Versões:

10/11/10 - v01: Criação de variáveis, funções iniciais, defines de portas e etc.
              O delay presente na rotina de filtro das teclas foi removida, logo deve ser feito um
              timer para chamar a rotina de teclas.

              - v02: Criação da base da rotina de atendimento à interrupção por borda no portb
                    Configuração do timer1
                    Enable das interrupções de timer1 e RB_Change

              - v03: Display, teclas e interrupções de timer 1 e RB testadas e funcionando

              - v04: Implementado o cálculo de frequencia e angulo

              - v05: Ajustes nas funções de leitura de teclas e escrita no LCD (não funcionou)

              - v06: continuação dos ajustes de escrita no LCD

              - v07: Implementação da interrupção
                    Implementação dos cálculos de angulo e frequencia
                    Implementação de média móvel

              - v08: Correção do BUG que gera erro de leitura de frequencia e angulo por estouro do timer1

Data: 26/11/10
=====
*/
//Includes e Defines:
#include <16F877.h>
#include <stdlib.h>

#fuses HS,NOPROTECT,PUT,NOLVP
#use delay(clock=20000000)

//-----
//DEFINES

//DEFINES ENTRADAS
#define Pulso_Tensao_R      PIN_B4 //Pulso de leitura da tensão da fase R
#define Pulso_Tensao_S      PIN_B5 //Pulso de leitura da tensão da fase S
#define Pulso_Tensao_T      PIN_B6 //Pulso de leitura da tensão da fase T
#define Pulso_Corrente_R    PIN_B7 //Pulso de leitura da corrente da fase R

#define chave_menu          PIN_C2 //Tecla Menu
#define chave_enter         PIN_D0 //Tecla Enter
#define chave_esc           PIN_C3 //Tecla ESC
#define chave_up            PIN_C0 //Tecla Up
#define chave_down          PIN_C1 //Tecla Down
#define port_b              0x06

//DEFINES SAÍDAS
#define Contatora           PIN_D1
#define LED                 PIN_D2
#define port_d              0x08

//Defines LCD
#define lcd_rs              PIN_D7
#define lcd_enable          PIN_D6
#define lcd_db4             PIN_D5
#define lcd_db5             PIN_D4
#define lcd_db6             PIN_C7
#define lcd_db7             PIN_C6

//DEFINES CONSTANTES

```



```

#define filtro_teclas          10           //Tempo para filtro das teclas;
#define cte_limpa_lcd          10000
#define num_aq_media_freq      19
#define num_aq_media_freq_mais_um 20
#define num_aq_media_angulo    19
#define num_aq_media_angulo_mais_um 20

// - - - - -

//Protótipos de funções
void le_teclas(void);           //Rotina de Leitura de teclas;
void inicializa_sistema(void);  //Rotina de inicialização das variáveis do sistema;
void angulo_lcd(float angulo);
void leitura_portas(void);

//Protótipos de funções de comando do LCD
void envia_nibble_lcd(int dado);
void envia_byte_lcd(int1 endereco, int dado);
void escreve_lcd(char c);
void limpa_lcd();
void inicializa_lcd();

//Declaração de Variáveis

float tempo_ciclo;
float freq;
float vetor_media_freq[20];
float media_freq;
float tempo_defasagem;
float tempo_grau;
float angulo;
float vetor_media_angulo[20];
float media_angulo;
float abs_media_angulo;

int16 tempo_limpa_lcd;          //Contador de tempo para limpar a tela;
int16 conta_ciclo;              //Variável que pega o valor do timer 1 para calculo de frequencia
int16 conta_defasagem;          //Variável que recebe o valor do timer 1 para calculo do angulo
int16 conta_esc;                //Contador usado para filtrar chave de entrada;
int16 conta_enter;              //Contador usado para filtrar chave de entrada;
int16 conta_menu;               //Contador usado para filtrar chave de entrada;
int16 conta_up;                 //Contador usado para filtrar relés de entrada;
int16 conta_down;               //Contador usado para filtrar relés de entrada;
int8 sw_ver;                    //Variável da versão do SW
int8 portb_lido;                //Variável de leitura do portb no início da interrupção
int8 mudancas;                  //Variável que compara estado atual com estado antigo do PORTB
int8 mult1_t2;                  //Multiplicador do timer 2
int8 mult2_t2;                  //Multiplicador do timer 2
int8 estouro_t1;                //Contador de estouros do timer 1
int8 flag_escreve_lcd;          //Variavel de controle da maq de estados de escrita no LCD
int8 flag_limpa_lcd;            //Flag para limpar LCD
int8 display;                   //Flag que registra o dado sendo mostrado no display
int8 conta_media_freq;          //ponteiro de escrita no vetor de frequencias
int8 conta_media_angulo;        //ponteiro de escrita no vetor de angulos
int8 i_freq;                    //contador para somatório da frequencia
int8 i_angulo;                  //contador para somatório do angulo
int8 conta_transitorio;         //contador de tempo do transitório de ligação
int8 conta_falha_angulo;        //conta tempo em que não há bordas de corrente
int8 mostra_valores;            //flag que autoriza a escrita na tela
int1 menu;                      //Flag de tecla já filtrada
int1 enter;                     //Flag de tecla já filtrada
int1 esc;                       //Flag de tecla já filtrada
int1 up;                        //Flag de tecla já filtrada
int1 down;                      //Flag de tecla já filtrada
int1 emergencia;                //02A - Bit 5 Registrador usado pelo software para leitura da
                                //chave de emergencia;
int1 rodando;                   //02A - Bit 6 Registrador que mantém o software rodando. Se for
                                //zerada, o software acaba;
int1 calcula_freq;              //flag que dispara o calculo da frequencia
int1 calcula_defasagem;         //flag que dispara o calculo da frequencia
int1 transitorio;               //flag que impede ação durante o transitório de ligação
int1 erro;                      //indica erros de qualquer natureza do sistema sendo medido
int1 nao_calcula_freq;          //indica que houve um estouro do timer 1 e que a frequencia não
                                //deve ser calculada
int1 nao_calcula_angulo;        //indica que houve um estouro do timer 1 e que o angulo não deve
                                //ser calculado
int1 rele_ativado;              //flag que registra se proteções do relé estão ativas

```

```
//ROTINA DE INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA
```

```
void inicializa_sistema(){
    set_tris_a(0x00);           //Configuração de entradas e saídas;
    set_tris_b(0xFF);
    set_tris_c(0b00001111);
    set_tris_d(0b10000000);
    set_tris_e(0x00);

    sw_ver=Versao;

    inicializa_lcd();           //chama rotina de inicialização do LCD;

    enable_interrupts(GLOBAL);
    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    enable_interrupts(INT_TIMER2);
    enable_interrupts(INT_RB);

    //setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_256);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_2); //Com Clock interno de 20MHz e prescaler em 2,
                                           //o Timer 1 estoura a cada 26,2144 ms
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,0xFF,8);

    tempo_limpa_lcd=0;
    conta_esc=0;
    conta_enter=0;
    conta_menu=0;
    conta_up=0;
    conta_down=0;
    esc=0;
    menu=0;
    enter=0;
    up=0;
    down=0;
    emergencia=0;
    output_low(LED);
    output_low(contatora);
    mudancas=0;
    clear_interrupt(int_rb);
    mult1_t2=0;
    mult2_t2=0;
    calcula_freq=0;
    calcula_defasagem=0;
    freq=0;
    conta_ciclo=0;
    tempo_ciclo=0;
    flag_escreve_lcd=0;
    flag_limpa_lcd=0;
    rodando=1;
    conta_media_angulo=1;
    conta_media_freq=0;
    conta_transitorio=0;
    transitorio=1;
    erro=0;
    display=0;
    rele_ativado=0;
    return;
}
```

```
//ROTINAS DE INTERRUPÇÃO
```

```
#priority rb,timer1,timer2
```

```
#int_rb
```

```
void portb_interrupt() {
    clear_interrupt(int_rb);           //limpa flag de interrupção do RB

    mudancas = portb_lido ^ input_b();
    portb_lido = input_b();
    if(estouro_T1>0){
        nao_calcula_freq=1;
        nao_calcula_angulo=1;
    }
}
```

```

    estouro_T1=0;
    return;
}
if (bit_test(mudancas,4)&& !bit_test(portb_lido,4)){ //Tensão_R Foi para nível baixo
    conta_ciclo=get_timer1(); //Le o valor do Timer 1 e grava em
                                //tempo ciclo

    conta_ciclo=conta_ciclo-15535; //Zera o timer para reinício da
    set_timer1(15535); //contagem

    if(nao_calcula_freq==0) calcula_freq=1; //Seta variável que aciona a rotina
                                                //de cálculo de frequencia

    nao_calcula_freq=0;
    estouro_T1=0;
    conta_falha_angulo++; //incrementa a flag que indica erro
                           // na corrente. se não for zerada
                           //pela outra borda, gera erro

}

if (bit_test(mudancas,7)&& !bit_test(portb_lido,7)){ //Corrente_R Foi para nível baixo
    conta_defasagem=get_timer1(); //Le o valor do Timer 1 e grava
                                    //em tempo ciclo

    conta_defasagem=conta_defasagem-15535;
    if(nao_calcula_angulo==0) calcula_defasagem=1; //Aciona o flag que dispara a
                                                    //rotina de calculo de angulo.

    nao_calcula_angulo=0; //o timer não é zerado pela
    conta_falha_angulo=0; //corrente, pois se fosse não
                           //seria possível
                           //medir frequencia.

}

if(portb_lido == input_b())return;
else{
    mudancas = portb_lido ^ input_b();
    portb_lido = input_b();
    if (bit_test(mudancas,4)&& !bit_test(portb_lido,4)){ //Tensão_R Foi para nível baixo
        conta_ciclo=get_timer1(); //Le o valor do Timer 1 e grava
                                    //em tempo ciclo

        conta_ciclo=conta_ciclo-15535;
        set_timer1(15535); //Zera o timer para reinício da contagem
        if(nao_calcula_freq==0) calcula_freq=1; //Seta variável que aciona a rotina de
                                                // cálculo de frequencia

        nao_calcula_freq=0;
        estouro_T1=0;
        conta_falha_angulo++; //incrementa a flag que indica erro na
                              //corrente. se não for zerada pela outra
                              //borda, gera erro

    }

    if (bit_test(mudancas,7)&& !bit_test(portb_lido,7)){ //Corrente_R Foi para nível baixo
        conta_defasagem=get_timer1(); //Le o valor do Timer 1 e grava
                                    //em tempo ciclo
        conta_defasagem=conta_defasagem-15535;
        if(nao_calcula_angulo==0) calcula_defasagem=1; //Aciona o flag que dispara a
                                                        //rotina de calculo de angulo.
        nao_calcula_angulo=0; //o timer não é zerado pela
        conta_falha_angulo=0; //corrente, pois se fosse não seria possível
                              // medir frequencia.

    }
    mudancas=0;
}
return;
}

#int_timer1
void Timer1_interrupt(){ //Ocorre estouro do T1 a cada
                          //0,0262144 segundos
                          //variavel para contagem de
                          //overflow do t1.

    estouro_T1++;

    if(estouro_T1==20){
        conta_transitorio=0;
        estouro_t1--;
    }
    clear_interrupt(int_timer1); //Em caso de de overflow
    return; //a freq é menor que aprox
} // 38,15Hz

#int_timer2
void Timer2_interrupt(){ //Ocorre estouro do T2 a cada 0,0065536 segundos
                          //variável de multiplicação de tempo

```

```

    mult2_t2++;
    if(mult1_t2>25){
        output_toggle(LED);
        mult1_t2=0;
    }
    if(mult2_t2>30){
        mostra_valores=1;
        mult2_t2=0;
    }

    le_tecclas();
    clear_interrupt(int_timer2);
    return;
}

```

//ROTINA DE LEITURA DE BOTOEIRAS

```

void le_tecclas(){

    if(input(chave_esc)){
        conta_esc++;
        if(conta_esc==filtro_tecclas){
            esc=1;

            conta_esc=0;
        }
        return;
    }
    else {
        conta_esc=0;
        esc=0;
    }

    if(input(chave_menu)){
        conta_menu++;
        if(conta_menu==filtro_tecclas){
            menu=1;

            conta_menu=0;
        }
        return;
    }
    else{
        conta_menu=0;
        menu=0;
    }

    if(input(chave_enter)){
        conta_enter++;
        if(conta_enter==filtro_tecclas){
            enter=1;

            conta_enter=0;
        }
        return;
    }
    else{
        conta_enter=0;
        enter=0;
    }

    if(input(chave_up)){
        conta_up++;
        if(conta_up==filtro_tecclas){
            up=1;

            conta_up=0;
        }
        return;
    }
    else{
        conta_up=0;
        up=0;
    }

    if(input(chave_down)){
        conta_down++;
        if(conta_down==filtro_tecclas){
            down=1;

```

```

        conta_down=0;
    }
    return;
}
else{
    conta_down=0;
    down=0;
}

return;
}

//ROTINAS DE TEXTO PRONTO PARA O LCD

void intro_lcd(){
    printf(escreve_lcd,"Rele Direcional ");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"Henrique Sauer ");
}

void angulo_lcd(float angulo){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Defasagem V->I ");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"%2.2f Graus      ",angulo);
}

void freq_lcd(float freq){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Frequencia V R ");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"%2.2f Hertz      ",freq);
}

void erro_frequencia_lcd(){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Erro");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"Frequencia");
}

void erro_angulo_lcd(){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Erro");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"Pot. Reversa");
}

void sem_corrente_lcd(){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Erro");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"Nao ha corrente");
}

void sem_tensao_lcd(){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Erro");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"Nao ha tensao");
}

void reiniciando_protecao_lcd(){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Reiniciando");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"Protecao");
}

void rele_desativado_lcd(){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Protecoes");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"Desativadas");
}

void rele_ativado_lcd(){
    limpa_lcd();
    printf(escreve_lcd,"Protecoes");
    envia_byte_lcd(0,0xc0);
    printf(escreve_lcd,"Ativadas");
}

```

```

}

//ROTINAS DE ESCRITA NO LCD

void envia_nibble_lcd(int dado)
{
    output_bit(lcd_db4, bit_test(dado,0));
    output_bit(lcd_db5, bit_test(dado,1));
    output_bit(lcd_db6, bit_test(dado,2));
    output_bit(lcd_db7, bit_test(dado,3));
    output_high(lcd_enable);
    delay_us(1);
    output_low(lcd_enable);
    return;
}

void envia_byte_lcd(int1 endereco, int dado)
{
    output_bit(lcd_rs,endereco);
    delay_us(100);
    output_low(lcd_enable);
    envia_nibble_lcd(dado>>4);
    envia_nibble_lcd(dado & 0x0f);
    delay_us(50);
    return;
}

void escreve_lcd(char c)
{
    envia_byte_lcd(1,c);
}

void limpa_lcd()
{
    envia_byte_lcd(0,0x01);
    delay_ms(5);

    return;
}

void inicializa_lcd()
{
    output_low(lcd_db4);
    output_low(lcd_db5);
    output_low(lcd_db6);
    output_low(lcd_db7);
    output_low(lcd_rs);
    output_low(lcd_enable);
    delay_ms(15);
    envia_nibble_lcd(0x03);
    delay_ms(5);
    envia_nibble_lcd(0x03);
    delay_ms(5);
    envia_nibble_lcd(0x03);
    delay_ms(5);
    envia_nibble_lcd(0x02);
    delay_ms(1);
    envia_byte_lcd(0,0x28);
    envia_byte_lcd(0,0x0c);
    limpa_lcd();
    envia_byte_lcd(0,0x06);
    return;
}

//=====
//=====          ROTINA PRINCIPAL          =====
//=====
void main(){

    inicializa_sistema();           //Chama rotina de inicialização
    intro_lcd();
    output_high(contatora);
    while(rodando){

        if(up){
            if(display<1)display++;
        }

        if(down){

```

```

    if(display>0)display--;
}

if(esc){
    reiniciando_protecao_lcd();
    delay_ms(1000);
    erro=0;
}
if(enter){
    if(!rele_ativado){
        rele_ativado_lcd();
        delay_ms(1000);
        rele_ativado=1;
    }
    else if(rele_ativado){
        rele_desativado_lcd();
        delay_ms(1000);
        rele_ativado=0;
        erro=0;
    }
}

//CALCULA FREQUENCIA

if(calcula_freq){
    tempo_ciclo=conta_ciclo*0.0000004;           //Transforma a contagem do timer 1 tempo
    freq=1/tempo_ciclo;                           //Calcula o a frequencia a partir do
                                                    //tempo obtido pelo timer
    calcula_freq=0;                               //Limpa flag que inicia o calculo
    if(conta_media_freq<=num_aq_media_freq){      //Se o ponteiro for menor que ou igual
                                                    //ao tamanho do vetor
        vetor_media_freq[conta_media_freq]=freq; //Escreve a ultima frequencia calculada
                                                    //na posição apontada pelo ponteiro
        conta_media_freq++;                       //incrementa a posição do ponteiro
        if(conta_media_freq>num_aq_media_freq){   //se ao incrementar o ponteiro,
                                                    //este ficou maior que o vetor
                                                    //então retorna para zero
                                                    //dessa forma a media movel fica variando
                                                    //a posição de escrita para descartar
                                                    //o valor mais antigo ao invés de rodar
                                                    //o vetor todo.
        }
    }
    media_freq=0;                                 //limpa o registrador da media movel
                                                    //todos os ciclos de calculo
    while(i_freq<=num_aq_media_freq){             //faz um somatório de todos
        media_freq=media_freq+vetor_media_freq[i_freq]; //os valores presentes no vetor
        i_freq++;
    }
    i_freq=0;
    media_freq=media_freq/num_aq_media_freq_mais_um; //depois de somar, divide
                                                    //pelo tamanho do vetor
                                                    //(endereço final + 1)
    if(display==1 && mostra_valores && !transitorio && !erro){ //se a interrupção do timer
        freq_lcd(media_freq);                          //setar o flag de escrita
        mostra_valores=0;                               //no display
        //escreve os valores
        //zera a flag
    }

    if(conta_transitorio<120){
        conta_transitorio++;
        if(conta_transitorio==120){
            transitorio=0;
        }
    }
}

//CALCULA_DEFASAGEM

if(calcula_defasagem){
    tempo_defasagem=conta_defasagem * 0.0000004; //Transforma a contagem do
                                                    //timer 1 em base de tempo

    tempo_grau=tempo_ciclo/360;                  //a partir do tempo medido pela
                                                    //rotina de frequencia, calcula
                                                    //o tempo de um grau

    angulo=tempo_defasagem/tempo_grau;           //divide o tempo medido da defasagem
}

```

```

//pelo tempo de um gram para obter
//o angulo

if(angulo>180) angulo=angulo-360;
angulo=-angulo;
calcula_defasagem=0;
if(conta_media_angulo<=num_aq_media_angulo){
    vetor_media_angulo[conta_media_angulo]=angulo;
    conta_media_angulo++;
    if(conta_media_angulo>num_aq_media_angulo){
        conta_media_angulo=0;
    }
}
media_angulo=0;
while(i_angulo<=num_aq_media_angulo){
    media_angulo=media_angulo+vetor_media_angulo[i_angulo];
    i_angulo++;
}
i_angulo=0;
media_angulo=media_angulo/num_aq_media_angulo_mais_um;

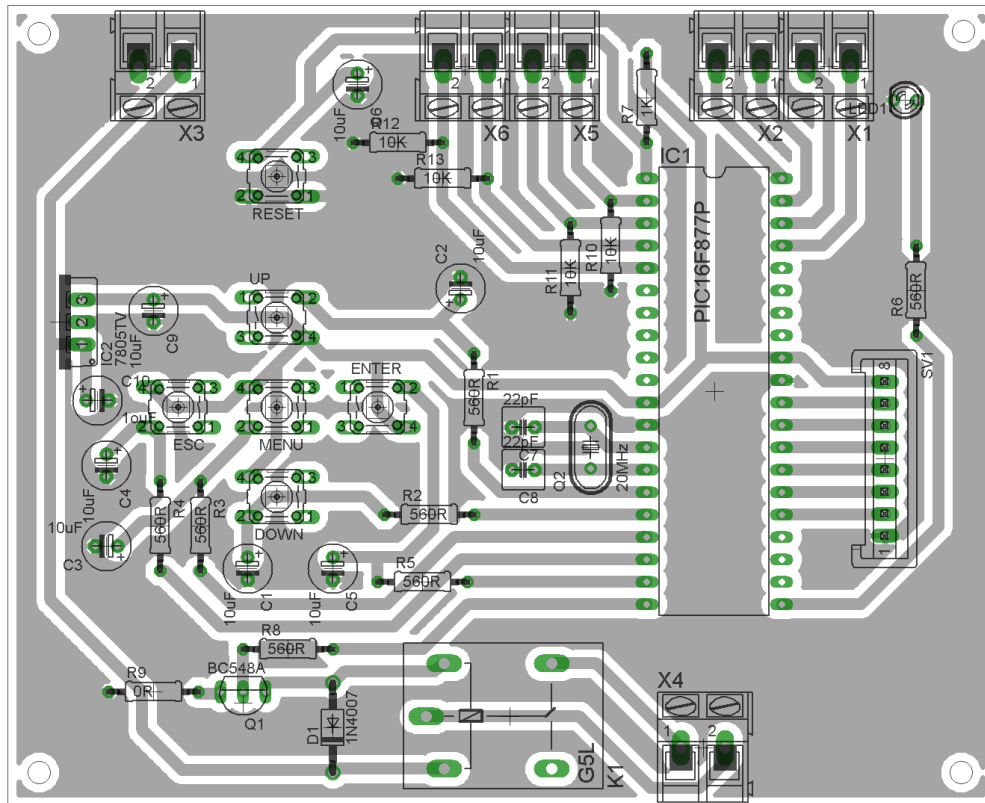
if(display==0 && mostra_valores && !transitorio && !erro){
    if(conta_falha_angulo<10)angulo_lcd(media_angulo);
    else sem_corrente_lcd();
    mostra_valores=0;
}

//AVALIA ERROS
if(erro==0 && rele_ativado==1){
    abs_media_angulo=abs(media_angulo);
    if((media_freq<58 || media_freq>62) && !transitorio){
        output_high(contatora);
        if(mostra_valores)erro_frequencia_lcd();
        mostra_valores=0;
        erro=1;
    }
    else if(estouro_T1>10){
        if(mostra_valores){
            sem_tensao_lcd();
            mostra_valores=0;
        }
    }
    else if((abs_media_angulo<=89) && (!transitorio)){
        output_high(contatora);
        if(mostra_valores && conta_falha_angulo<10){
            erro_angulo_lcd();
            mostra_valores=0;
            erro=1;
        }
    }
    else if(mostra_valores && conta_falha_angulo>10 && !transitorio){
        sem_corrente_lcd();
        mostra_valores=0;
        erro=1;
    }
    else{
        output_low(contatora);
    }
}

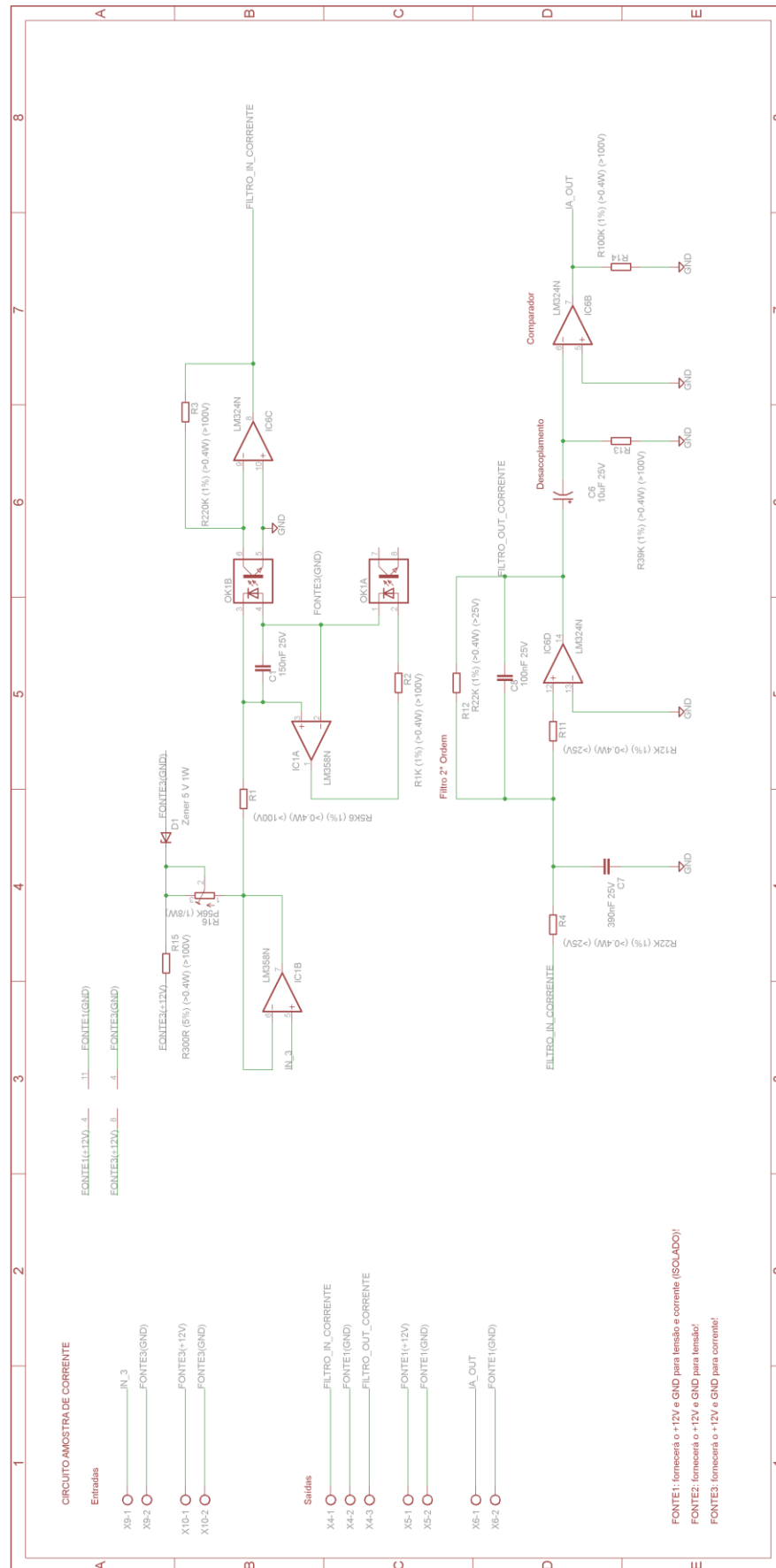
// - - - - -

```


Anexo D – Layout e esquemático das placas em Eagle CAD



Esquemático da leitura de tensão no Eagle



Esquemático da leitura de corrente no Eagle

Anexo E – Tabela completa dos ensaios realizados na PCE

Ensaio relé de Potência Reversa - PCE 02/12/2010 (Tabela Completa)								
Analisador Fluke				Relé Direcional		Painel Usina		
Ângulo (Graus)	Freq (Hz)	Tensão (V)	Corrente (A)	Ângulo(Graus)	Freq (Hz)	Potência Ativa	Potência Reativa	Vel (RPM)
-80	59,99	122,0	6,60	-76,20	59,99	0,3kW (M)	2,4kW	1800
-82	60,02	122,5	6,50	-78,80	60,04	0,2kW(M)	2,3kW	1800
-84	60,01	122,4	6,60	-80,20	60,02	0,2kW(M)	2,3kW	1802
-86	60,00	122,3	6,60	-82,10	60,02	0,1kW(M)	2,4kW	1802
-88	59,99	122,7	6,50	-84,10	60,02	0kW	2,4kW	1804
-90	59,98	122,4	6,50	-85,20	60,00	0kW	2,4kW	1803
-92	60,00	122,2	6,50	-87,10	60,01	0,1kW(G)	2,4kW	1805
-94	60,01	121,0	6,80	-89,00	59,99	0,2kW(G)	2,4kW	1807
-96	60,00	122,9	6,80	-90,10	60,00	0,3kW(G)	2,5kW	1811
-98	60,02	122,7	6,80	-91,11	60,02	0,3kW(G)	2,5kW	1814
-100	60,03	122,9	7,00	-92,80	60,04	0,5kW(G)	2,4kW	1811

Anexo F – Exemplo de diagrama de proteções para geradores

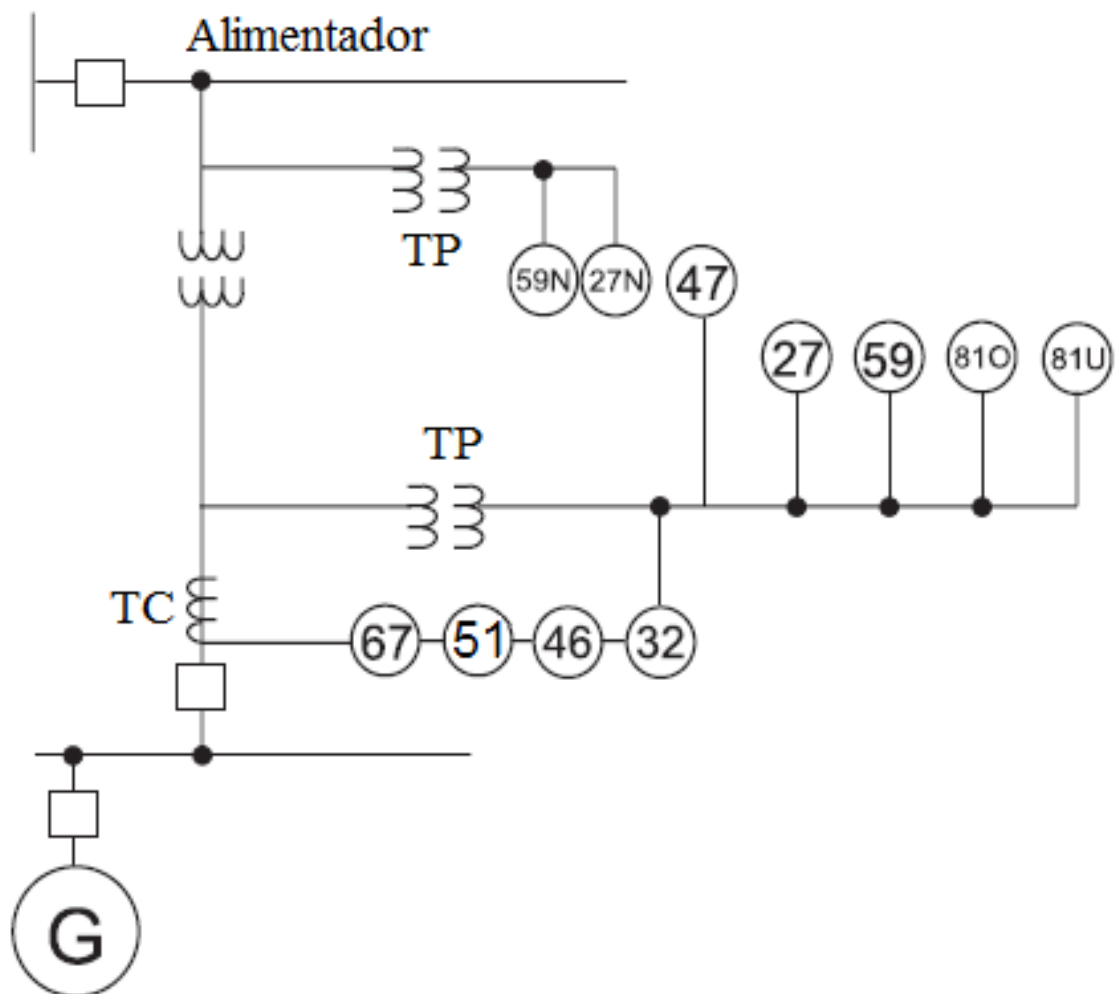


Imagem adaptada de: Hornak, Donald L. - Distributed Generation Interconnections: Protection, Monitoring, And Control Opportunities. Highland, Illinois - EUA